

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان-
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID



قسم الري كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie Département d'Hydraulique

Mémoire de Magister:

**ETUDE DU TRANSPORT DES SEDIMENTS EN
SUSPENSION A L'ECHELLE
EVENEMENTIELLE**

Présenté par :

M^{me}. Nacef Hayat

Soutenue le : 08 Décembre 2013

Devant les membres de Jury

Président : Mr Seddini Abdelali

Professeur à l'UABT

Examineur : Mr Bouanani Abderrezak

Professeur à l'UABT

Examineur : Mr Ghenim Abderrahman Nekkache MCA à l'UABT

Encadreur : Mr Megnounif Abdesselam

MCA à l'UABT

Remerciements

Le travail est le fruit de la collaboration de plusieurs personnes que je tiens à remercier.

Mes vifs remerciements s'adressent à mon encadreur Mr Megnounif. Je le remercie pour sa disponibilité, sa rigueur, ses encouragements et ses critiques ainsi que pour ses conseils constructifs afin d'arriver à terme de ce travail ;

Je tiens également à remercier tout le personnel de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de la wilaya d'Alger pour les données qu'ils ont mise à ma disposition.

Mes remerciements vont également à tous les membres de jury pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire.

Je remercie, Mr le professeur Seddini, d'avoir accepté de présider le jury, je lui en suis très reconnaissante.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les membres de Jury qui sont aussi mes enseignants :

- Mr Bouanani Abderrezak, examinateur.
- Mr Ghenim Abderrahman, examinateur.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- Mon père pour son soutien moral et matériel et ma très chère mère qui ma entouré avec beaucoup d'affection et d'amour (que dieu les garde).
- A mes très chers frères et sœurs.
- A mon cher mari Omar pour ses encouragements et son aide considérable.
- A mes chères amies : Hayat, Chahinaz, Farida, Nora.
- A toute ma famille du plus petit au plus grand. A tout ma belle famille.
- Touts ceux qui me son chers.

الملخص

الجزائر تتميز بمناخ شبه جاف، مهدد بانجراف التربة الصالحة للزراعة ينتج عنه مواد صلبة و ترسبات في السدود. سنقوم بدراسة صيغة العلاقة بين التدفق المائي و تركيز المواد الصلبة العالقة لفهم الظواهر التي تؤثر على الحوض , سبع نماذج تم إظهارها لدراسة هذه العلاقة مع إدراجها علي ثلاث حالات : الهيئة, الطاقة التي تبين قدرة النقل للتدفق مع إظهار أهم الظواهر المسؤولة علي صيغة العلاقة بينهما. تمت الدراسات على مستوى أربعة أحواض: حوض واد سكاك, حوض واد يسر, حوض واد صاف- صاف, حوض واد الكبير. دراسة مفصلة على إحصائيات الصيغة و تأثير الوقت وصول الحدث على مستوى حوض الاخضارية.

الكلمات المفتاحية:

التدفق المائي, تركيز المواد الصلبة, فيضان ,شمال الجزائر

Résumé

L'Algérie, caractérisée par un climat semi aride est menacée par l'érosion des terres agricoles qui provoque le transport solide et l'envasement des barrages. L'analyse de la forme de l'hystérésis produite entre les débits et concentration mesurés à l'exutoire d'un bassin versant est utilisée pour comprendre les processus qui opèrent dans le bassin versant et qui conditionnent la production des sédiments. Sept types de forme sont déterminées pour étudier cette relation, à savoir : courbe simple, hystérésis positive, hystérésis négative, hystérésis en forme de huit et courbe simple avec une boucle soit positive soit négative et forme complexe (courbe simple plus plusieurs boucles).

Trois aspects sont investis, analyse de la forme de l'hystérésis produite, analyse de l'aspect énergie traduisant la capacité de transport de l'écoulement, le troisième aspect est l'identification des principaux processus responsables de la forme de la relation C-Q. L'étude est menée à travers quatre bassins versants, oued Isser à la station de Remchi, Oued Isser à la station de Lakhdaria, Oued Saf-Saf à la station de El Ancer et Oued El Kebir à la station de Khemakhem.

Une étude détaillée sur les statistiques des formes, et l'influence du temps d'arrivée des événements produits à la station de Lakhdaria est présentée.

Mots-clés : débit liquide, concentration, crue, hystérésis, nord Algérie.

Abstract

Algeria, characterized by a semi-arid climate is threatened by the erosion of the arable lands which causes solid transport and they can reduction in the capacity of a stream for handling floods.

The analysis of the form of the hysteresis produced between the flows and concentration measured with the discharge system of a catchment area is used to understand the processes which operate in the catchment area and which condition the production of the sediments. Seven common classes of such relations are: single-valued (straight or curved), clockwise loop, Counterclockwise loop, figure eight, single-valued plus a loop, clockwise or Counterclockwise, and form complex (single-valued plus several loops).

Three aspects are invested, analyze form of produced hysteresis and analyze aspect energy translating the transport capacity of the flow, the third aspect is the identification of the main processes responsible for the form of relation C-Q. The study is undertaken through four mining areas slopes, Oued Isser in the station of Remchi, Oued Isser in the station of Lakhdaria, Oued Saf-Saf in the station of El Ancer and Oued El Kebir in the station of Khemakhem.

A study detailed on the statistics of the forms, and influences it inbound time of the events produced at the station of Lakhdaria is forwarded.

Key words: water discharge, sediment concentration, flood, hysteresis, north Algeria

Liste des figures

Figure 1.1 : Exemples de végétation qui occupe la 1 ^{ère} zone.....	15
Figure 1.2 : Exemples de végétation qui occupe la 2 ^{ème} zone.....	16
Figure 1.3 : Exemples de végétation qui occupe la 3 ^{ème} zone.....	16
Figure 1.4 : Exemples de végétation qui occupe la 4 ^{ème} zone.....	17
Figure 1.5 : Exemples de végétation qui occupe la 6 ^{ème} zone.....	18
Figure 1.6 : Bassins hydrographiques de l'Algérie	23
Figure 1.7 : Présentation du bassin versant d'Oued Isser à la station de Remchi.....	25
Figure 1.8 : Présentation du bassin de Oued Isser à la station Lahkdaria.....	27
Figure 1.9 : Présentation du bassin versant Oued El Kebir à la station d'El Ancer	29
Figure 1.10 : Présentation hydrologique du bassin d'Oued Saf Saf (Station Khemakhem).....	30
Figure 2.1 : Présentation de la classe I produisant une courbe simple sous forme de droite linéaire, (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps, (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide.....	34
Figure 2.2 : Présentation de la classe I produisant une courbe simple sous forme de courbe convexe, (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps, (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide... ..	34
Figure 2.3 : Présentation de la classe I produisant une courbe simple sous forme de courbe concave, (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps, (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide.....	35

Figure 2.4 : Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide ayant une forme de courbe simple.....	36
Figure 2.5 : schématisation de la forme convexe.....	37
Figure 2.6 : schématisation de la forme concave.....	37
Figure 2.7 : Exemples des événements de crue montrant des relations concentration-débit liquide sous forme de courbes simples : linéaire, convexe et concave.....	39
Figure 2.8 : Forme d'hystérésis positive ; (a) Schématisation de l'évolution de débit liquide et de la concentration en fonction de temps ; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide.....	40
Figure 2.9 : Exemples d'événement de crue générant des hystérésis en forme positive...	42
Figure 2.10 : Exemples des hystérésis positives produites par les premières crues automnales.....	43
Figure 2.11 : Succession de deux événements de forme positive (1er exemple).....	44
Figure 2.12: Succession de trois événements de forme positive.....	46
Figure 2.13: Succession de deux événements de forme positive (2 ^{ème} exemple).....	46
Figure 2.14 : Exemples des hystérésis positives ouvertes.....	48
Figure 2.15 : Exemples des hystérésis positives fermées.....	49
Figure 2.16 : Hystérésis négative (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps ; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide.....	51
Figure 2.17: Exemples des hystérésis négatives	53
Figure 2.18 : Exemple des hystérésis négatives générer par des affluents tardive	54
Figure 2.19: Exemples des hystérésis négatives précédés par des événements très importants marquant une période humide.	57
Figure 2.20: Exemples des hystérésis négatives ouvertes.....	58
Figure 2.21: Exemples des hystérésis négatives fermées.....	59

Figure 2.22: influence de la succession des événements sur la production des Sédiments.....	61
Figure 3.1 : (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps pour une hystérésis en forme en huit ; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide pour une hystérésis en forme en huit.....	63
Figure 3.2 : Exemples d'hystérésis en forme de huit	65
Figure 3.3: Exemples d'hystérésis en forme de huit (boucle positive puis boucle négative).	68
Figure 3.4: (a) Schématisation de l'évolution de débit liquide et de la concentration en fonction du temps pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle positive; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle positive.....	70
Figure 3.5: (a) Schématisation de l'évolution de débit liquide et de la concentration en fonction du temps pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle négative; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle négative.....	71
Figure 3.6 : Exemples des hystérésis de type courbe simple plus boucle.....	73
Figure 3.7 : Exemples des hystérésis de forme	76
Figure 3.8 : Exemple de décomposition d'une courbe complexe en courbes simples.....	78
Figure 4.1 : Cumul des apports classés en eau et en matières solide en suspension drainés par Oued Isser pour période (septembre 1971-Août 2001).....	81
Figure 4.2 : Apports en eau et en matières solide pour les tranches de temps 1, 4, 5 et 10% du temps annuel, calculés à partir des cumuls drainés par Oued Isser pour période (septembre 1971-Août 2001).....	81
Figure 4.3 : Contribution des apports liquide et solide suivant les formes d'hystérésis....	83
Figure 4.4: Contribution des apports liquide et solide suivant les formes d'hystérésis	

pour la saison d'automne.....	86
Figure 4.5 : Contribution des apports liquide et solide suivant les formes d'hystérésis	
pour la saison d'hiver.....	88
Figure 4.6: Contribution des apports liquide et solide suivant les formes d'hystérésis	
pour la saison de printemps.....	89
Figure 4.7 : Contribution des apports liquide et solide suivant les formes d'hystérésis	
pour la saison d'été.....	91
Figure 4.8 : Répartition saisonnières des apports liquides et solides de l'oued Isser	
(période Septembre 1971/ Août 2001).....	92
Figure4.9: Apport Liquides annuels de l'oued Isser à Lakhdaria (période Septembre 1971/	
Août 2001).....	95
Figure4.10: Apport Solides annuels de Oued Isser à Lakhdaria (période Septembre 1971/	
Août 2001).....	96
Figure 4.10: Dégradation spécifique annuels de l'oued Isser à Lakhdaria	
(période Septembre 1971/ Août 2001).....	97

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les étages bioclimatiques en Algérie	19
Tableau 1.2 : Principaux paramètres hydro-morphologique des quatre bassins d'étude.....	24
Tableau 4.1: Statistique sur les crues et leurs contributions en apports en eau et matières solides en suspension suivant le type d'hystérésis (période septembre 1971- août 2001)....	83
Tableau 4.2: Contribution de la dégradation spécifique et de la concentration suivant le type d'hystérésis pour le bassin versant de Lakhdaria (période septembre 1971- août 2001).....	85
Tableau 4.3 : Bilan des apports liquide solide suivant les formes pour la saison « d'automne».....	86
Tableau 4.4 : Bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison « hiver ».....	88
Tableau 4.5 : bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison de « printemps ».....	90
Tableau 4.6 : bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison «d'été ».....	91
Tableau 4.7 : Apports liquides et solides moyens saisonnières à oued Isser (période Septembre 1971/ Août 2001).....	93
Tableau 4.8: Statistiques des classes par saison.....	93

SOMMAIRE

RESUME / ABSTRAT/ ملخص

Introduction Générale.....	7
1. Chapitre Présentation de la zone d'étude.....	10
1.1. Introduction	10
1.2.Climat du Maghreb.....	10
1.3.Présentation général de l'Algérie.....	12
1.3.1.Pluviométrie	12
1.3.1.1. Variabilité spatiale	12
1.3.1.2. Variabilité temporelle	13
1.3.2.Les températures	13
1.3.3. Le vent	13
1.3.4.Les étages bioclimatiques	14
1.3.5.Les ressources en sols	19
1.3.6.Hydrologie	20
1.4. Bassins versants d'étude	21
1.4.1.Définition d'un bassin versant.....	22
1.4.2.Choix des bassins d'étude.....	22
1.4.2.1. Bassin d'oued Isser à la station de Remchi.....	24
1.4.2.2. Bassin d'oued Isser à la station de Lakhdaria	26
1.4.2.3. Bassin d'Oued El Kebi.....	27
1.4.2.4. Bassin d'oued Saf-Saf	29
2. Chapitre Hystérésis de forme simple	31
2.1. Introduction.....	31
2.2. Donnée de mesure.....	32

2.3. Classe 1: Relation en courbe simple.....	33
2.3.1. Explication par la forme	33
2.3.1.1. <i>Linéaire (ligne droite)</i>	33
2.3.1.2. <i>Courbe convexe</i>	34
2.3.1.3. <i>Courbe concave</i>	35
2.1.1. Explication par l'énergie	35
2.1.1.1. <i>Cas d'une droite</i>	36
2.1.1. <i>Cas d'une courbe non linéaire</i>	37
2.1.2. Principaux processus responsables de l'absence d'hystérésis (courbe simple)	39
2.2. Classe 2 : hystérésis positive	39
2.2.1. Explication par la forme	39
2.2.2. Explication par l'énergie	41
2.2.3. Principaux processus responsable de la forme hystérésis positive	42
2.2.3.1. <i>Le lessivage en anglais "Wash-load"</i>	42
2.2.3.2. <i>La remise en suspension</i>	44
2.2.3.3. <i>La dilution</i>	47
2.2.4. Boucle ouverte et boucle fermée	47
2.3. Classe 3 : Négative	50
2.3.1. Explication par la forme	50
2.3.2. Explication par l'énergie	51
2.3.3. Principaux processus responsables de la forme hystérésis négative	53
2.3.3.1 <i>Répartition des précipitations</i>	53
2.3.3.2. <i>Erosion local</i>	55
2.3.3.2.1. <i>Mouvement en masse</i>	55
2.3.3.2.2. <i>Effondrement des berges</i>	55
2.3.3.2.3. <i>Affouillement</i>	55
2.3.4. Boucle ouverte et boucle fermée	57

3. Chapitre Hystérésis de forme combinée	62
3.1. Introduction	62
3.2. Classe 4 : Forme en huit	62
3.2.1. Explication de la forme	63
3.2.2. Explication par l'énergie	64
3.2.3. Principaux processus responsable de l'hystérésis en forme en huit	66
3.2.3.1. <i>Première boucle</i>	66
3.2.3. Le lessivage en anglais "Wash-Load"	67
3.2.3.1.2. La remise en suspension	67
3.2.3.2. <i>Deuxième boucle</i>	67
3.2.3.2.1. L'effondrement des berges	67
3.2.3.2.2. Affouillement	67
3.2.3.2.3. Mouvement en masse	67
3.2.3.2.4. Arrivée tardive d'un affluent chargé en sédiment	68
3.2. Classe 5 : hystérésis en forme de courbe simple plus une boucle...	69
3.3.1 Courbe simple plus une boucle positive.....	69
3.3.1.1. <i>Explication par la forme</i>	69
3.3.1.2. <i>Explication par l'énergie</i>	70
3.3.1.3 <i>Principaux processus responsable de la forme d'hystérésis en courbe simple plus boucle positive</i>	70
3.3.2. Courbe simple plus une boucle négative	71
3.3.2.1. <i>Explication par la forme</i>	71
3.3.2.2. <i>Explication par l'énergie</i>	72
3.3.2.3. <i>Principaux processus responsable de la forme d'hystérésis en courbe simple plus boucle négative</i>	72
3.3. Relation en forme complexe.....	74

3.4.1. Explication par la forme	74
3.4.2. Explication par l'énergie	74
3.4.3. Principaux processus responsable de l'hystérésis en forme complexe	74
4. Etude du transport solide en suspension produit dans le bassin versant de Lakhdaria.....	79
4.1. Introduction.....	79
4.2. Variabilité instantanée	79
4.3. Variabilité à l'échelle événementielle.....	82
4.3.1. Principales caractéristiques	82
4.3.2. Processus dominants	84
4.4. Variabilité à l'échelle saisonnière	85
4.4.1. Automne	85
4.4.2. Hiver	87
4.4.3. Printemps	89
4.4.4. Eté	90
4.5. Variabilité saisonniers des apports liquides et solides.....	92
4.6. Variabilité à l'échelle annuelle	94
Conclusion Générale.....	98

Les Références

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Les fleuves et les rivières ont un rôle prépondérant sur l'environnement en reliant les continents aux océans. L'eau drainée dépend du cours d'eau et des versants. Elle est à la fois ressource, milieu de vie pour de nombreux organismes végétaux et animaux, mais aussi vecteur d'énergie et de matières diverses. De ce fait, tout aménagement lié à l'hydro-système nécessite une bonne compréhension des processus qui conditionnent aussi bien le cheminement, que ceux qui affectent la qualité et la quantité des matières associées à l'eau.

La compréhension du phénomène du transport des sédiments en suspension constitue un enjeu important en termes de gestion des cours d'eau. En effet, les Matières En Suspension (MES) constituent un vecteur privilégié du transport d'éléments polluants et nutriments. Elles peuvent également provoquer l'envasement progressif des ouvrages hydrauliques. Aussi, une concentration des MES trop élevées peut avoir un impact négatif sur les écosystèmes aquatiques.

En raison de son climat semi-aride, de la présence de relief abrupt et de la pauvreté de la végétation, les cours d'eau Maghrébins sont amenés à transporter de grandes quantités de sédiments, estimées à 251,5 millions de tonnes par an (Probst & Amiotte-Suchet, 1992). D'après Colombani (1977) et Ghorbal & Claude (1977) entre 37% et 98% des sédiments produits dans les bassins versants Maghrébins se déposent dans les réservoirs hydrauliques.

Dans cette partie du monde, l'érosion hydrique reste un problème majeur, car elle entraîne un appauvrissement progressif des sols et affecte aussi bien la production agricole et le rechargement des nappes souterraines.

Heusch & Millies-Lacroix (1971) estiment entre 265 et 2569 t/km²/an la dégradation spécifique annuelle moyenne dans les bassins versant Maghrébins. Alors que Walling (1984) estime ces dégradations entre 1000 et 5000 t/km²/an. Probest & Amiotte-Suchet (1992) ont avancé des valeurs supérieures à 5000 t/km²/an pour cinq bassins versants, comme le cas du bassin versant d'Agrioun en Algérie où la dégradation spécifique a été estimée à 7200 t/km²/an.

Des dégradations nettement inférieures ont été observées dans d'autres bassins du Maghreb. A l'Oued Elham en Algérie, bassin du Hodna Hasbia et al. (2012) estiment les dégradations à 530 t/km²/an. Les dégradations spécifiques moyennes au Maroc, estimée par Snoussi (1988) sont de l'ordre de 504 t/km²/an. Sur la base de 130 bassins versants des trois pays de Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie), Probst & Amiotte-Suchet ont estimé une dégradation spécifique moyenne de 400 pour les rivières qui se jettent dans la mer Méditerranée et 610 t/km²/an pour celles qui se jettent dans l'océan Atlantique.

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. En Algérie, la partie Ouest du pays est la plus vulnérable à l'érosion. Elle concerne 47% de l'ensemble des terres ; suivie du centre (27%) et de l'est (26%) (Achite et al, 2006).

En conséquence, tout aménagement lié à l'hydro-système nécessite une prise en compte du flux sédimentaire, tant de point de vue qualitatif que quantitatif. Cependant, il est connu que le transport des sédiments se fait principalement en période de crues et que les principaux facteurs qui contrôlent la production et le transport en suspension dans les bassins versants sont dus essentiellement à l'effet conjugué de l'intensité des précipitations, la configuration du bassin versant comme la géologie et la biophysio-graphie (morphologie, couvert végétal et nature du sol...) et les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau (Owens 1999 ; Asselman 1999 ; Lenzi, 2000 ; Brasington 2008).

De ce fait le transfert fluvial des sédiments s'avère difficile à quantifier (Graf 2000 ; Asselman 2000 ; Rovira et Batalla 2006). Le flux varie fortement à l'échelle temporelle (événementielle, saisonnière et annuelle) et à l'échelle spatiale (entre les zones source de sédiment et l'exutoire, entre bassins versant à typologie différentes), et ce, en raison de facteurs naturels (géomorphologie, climatologie, type de couverture végétale). De plus, les processus de transfert de matières peuvent être fortement modifier par des activités anthropique (e.g. présence de barrage, construction de route, urbanisation, ...).

Dans ce contexte, nous allons essayer de comprendre les mécanismes et les processus responsable de la dynamique des sédiments à l'échelle événementiel, saisonnière et annuelle. L'étude est menée sur quatre bassins versants pour caractériser le nord de l'Algérie. Le bassin de Remchi à l'ouest, Lakhdaria au centre et El Ancer ainsi que Khemakhem à l'est Algérien. A cet effet on analysera le mode d'évolution de la charge solide C en fonction des débits liquides Q durant les différents évènements de crues en s'appuyant sur l'analyse des

Formes d'hystérésis produites. Ce genre d'étude a été introduit initialement par Wood (1977) pour étudier les événements des crues dans un bassin versant en Angleterre. Plus tard, Williams (1989) et Asselman (1999) présentent une classification détaillée des différents types d'hystérésis représentant l'évolution des crues dans les rivières des Etats-Unis d'Amérique.

Ce travail apportera des éléments des repenses partiels aux problématiques générales abordées dans ce présent mémoire, il est présenté en quatre chapitres selon l'agencement exposé ci-après.

Dans le **premier chapitre** on présente une description générale des régions d'étude.

Le **second chapitre**, est consacré à l'analyse typologique du mode d'évolution de la charge solide C en fonction des débits liquide Q durant différents événements de crue en présentant une classification détaillée des différents types d'hystérésis. Les formes simples font l'objet de ce chapitre. Chaque type est expliqué par la forme, l'énergie et les principaux processus responsables de la dynamique des sédiments.

Le **troisième chapitre**, est consacré à l'analyse du mode d'évolution de la charge solide C en fonction des débits liquide Q pour les formes combinées.

Le **quatrième chapitre** a pour but de comprendre la production des sédiments, l'origine et les cheminements des particules solides transportées en suspension à l'échelle événementielle, saisonnière et annuelle par l'analyse des différents types d'hystérésis. Cette étude est menée sur le bassin versant de l'oued Isser à la station de Lakhdaria située dans l'Algérois. L'étude couvre une période de 30 ans allant de Septembre 1971 à Août 2001.

CHAPITRE I
PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Chapitre

Présentation de la zone d'étude

1.1. Introduction :

L'Algérie est un pays à dominance semi-aride. De nos jours, la vulnérabilité au changement climatique est réelle et comporte à la fois une dimension hydrique (pénurie de la nappe phréatique), une dimension agraire (chute de rendements) et environnementale (fragilisation des sols et recrudescence de l'érosion).

La dynamique des particules érodées est générée par des processus complexes et discontinus à fortes variations spatiotemporelles, difficiles à décrire sous forme d'équations mathématiques. Dans ce contexte, et afin de mettre en évidence les relations entre le transfert de matières solides et différents paramètres hydro-climatiques, géomorphologiques et biologiques, plusieurs études ont été menées dans différentes régions du globe. On cite, à titre d'exemple, les travaux de Fournier (1960), Heusch & Millies-Lacroix (1971), Walling & Weeb (1981), Demmak (1982), Milliman & Meade (1983) et Probst & Amiotte-Suchet (1992). L'objectif de ces recherches est d'une part, expliquer les processus du transport solide dans les cours d'eau et d'autre part, mettre en évidence des modèles susceptibles de décrire la dynamique des sédiments notamment dans les régions ou bassins versants non jaugés.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le transport des sédiments en Algérie de Nord.

1.2. Climat en Maghreb :

Le Maghreb se trouve dans une région aride à semi-aride avec un climat saharien dans la partie sud, océanique sous influence méditerranéenne dans la partie nord générant ainsi un contraste climatique important.

Le Nord du Maghreb, se situe sous un climat de transition, entre la zone tempérée et la zone tropicale. Cette position, le met sous l'influence directe du climat méditerranéen, caractérisé par le rythme saisonnier suivant :

- L'été est soumis à l'influence des hautes pressions subtropicales qui, en égard à la latitude, donne un temps sec et chaud à l'intérieur et un temps doux au bord de mer.
 - En hiver, le retrait des hautes pressions vers les latitudes plus basses livre la région à la circulation zonale d'ouest faisant un temps plus frais et plus humide.
- Le relief de l'Atlas tellien entrave l'écoulement de l'air qui arrive de l'Ouest pour envahir le bassin méditerranéen. Cet écoulement est due à la circulation d'air polaire froid qui au contact des eaux chaudes provoque une cyclogenèse active. Cette circulation est responsable des deux tiers des perturbations activant dans la région. Le déplacement progressif et lent des perturbations vers le sud explique la diminution progressive des pluies vers le sud et l'allongement de la saison sèche.

Les particularités géographiques et écologiques du Maghreb font que les précipitations accusent une grande variabilité spatiale et temporelle.

Outre cette variabilité, les études indiquent que le 20^{ème} siècle a connu des changements important avec une nette augmentation de la température atteignant plus de 1°C les 40 dernières années (Agoumi.A, 2002). Les recherches montrent aussi une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations accentuée par la nature excessive des rares années humides en intermittence avec de longues périodes sèches. Aussi, la concentration des pluies est très prononcée le long de l'année. Les inondations de 2001 à Bab El Oued à Alger, en 2008 à Ghardaia et celles qu'à connu récemment le Nord de l'Algérie sont là pour le confirmer. En effet, en deux à trois jours, les pluies cumulent quelques centaines de millimètres. Ces fortes précipitations ont généré des écoulements superficiels excessifs et sont à l'origine des catastrophes naturelles, notamment la mobilisation d'importantes quantités de matières solides en suspension.

1.3.Présentation général de l'Algérie :

L'Algérie est située au centre du Nord de l'Afrique avec près de 1200 km de côte sur la mer Méditerranée. Le relief de l'Algérien du nord se compose de deux principales chaines montagneuses : l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Ces deux chaines parallèles parcourent le pays d'ouest en est. Elles se rapprochent au centre du pays jusqu'à presque se confondre aux Aurès à l'extrême est. Ces montagnes constituent des frontières naturelles entre lesquelles s'intercalent de vastes plaines et hauts-plateaux.

Au sud, avec 2 millions de Km², la Sahara est l'un des plus grands déserts du monde. Il représente plus de 80% de superficie de l'Algérie et se compose d'immenses dunes, de plaines de sable (ergs), de plaines de pierres (regs), d'oasis et de Montagnes volcanique (Massif d Tassili et de Hoggar). (Cote.M, 1981)

1.3.1. Pluviométrie :

1.3.1.1. Variabilité spatiale :

La pluviométrie de l'Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (Seltzer, 1913-1938, Medinger, 1913-1953, Chaumont & Paquin, 1913-1963). Les moyennes annuelles varient de moins de 25 mm dans les régions sahariennes à plus de 1500 mm dans certaines localités du nord. Elles diminuent du nord au sud et d'est en ouest.

Le gradient longitudinal de la pluviosité augmente d'ouest en est de 450 mm/an à Oran à plus de 1000 mm/an à Annaba. Ce gradient est dû à la Sierra Nevada espagnole et l'Atlas marocain agissent comme écran au Nord-Ouest de l'Algérie et éliminent ainsi l'influence atlantique. Alors qu'à l'est, les fortes précipitations sont attribuées aux perturbations pluvieuses provenant du nord de la Tunisie.

Quant au gradient latitudinal, il varie en moyenne annuelle de 50 mm dans la région du M'Zab à 1500 mm à Jijel. La diminution du littoral vers les régions sahariennes est due à la grande distance traversée par les dépressions qui doivent affronter sur leur parcours les deux chaînes de l'Atlas. De plus, le gradient altitudinal universel varie en fonction de l'éloignement de la mer favorisant une dissymétrie prononcée. Les versants exposés au nord, en ubac, sont les mieux arrosés, alors que ceux exposés au sud, en adret, sont plus secs.

1.3.1.2. Variabilité temporelle :

Durant le dernier siècle, l'Algérie du nord à connu de nombreuses sécheresses d'ampleur variable. Certaines ont eu des répercussions parfois dramatiques sur les conditions de vie de la population, notamment rurale comme celles survenues en 1914 et 1943. Mais les plus sévères et les plus persistantes sont celles marquant la fin du 20^{ème} siècle. Le déficit pluviométrique a atteint 12% pour la région du centre, 13% pour la région est et 20% pour la région ouest (Medjerab, 1998). Ghenim et al., (2013) et Megnounif et al. (2013) quantifient entre 26% le déficit dans le bassin versant de la Tafna.

De plus, les précipitations accusent une grande irrégularité aussi bien au cours de l'année qu'à l'échelle annuelle. Certaines années ont reçu des précipitations abondantes, provoquant des inondations parfois catastrophiques, comme au cours des années 1935, 1974, 1996, 1999, 2001, 2010 (Medjerab, 1998).

1.3.2. Les températures :

La moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m) est comprise entre 0°C et 9°C dans les régions littorales et entre -2°C et +4°C dans les régions semi-arides et arides au centre du pays et sur les haute plateaux. La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud varie avec la continentalité, de 28°C à 31°C sur le littoral, de 33°C à 38°C dans les hautes plaines steppiques et supérieures à 40°C dans les régions sahariennes (Nadjraoui. 2001).

Au nord, l'été est chaud et sec, alors que l'hiver est doux et humide. Les températures moyennes varient, aussi, en fonction de l'altitude. Dans le Sahara, l'amplitude thermique est très élevée (de 49°C le jour à moins de -10°C la nuit) (Derouiche. 2007).

1.3.3. Le vent :

Le vent est peu uniforme, il varie d'une région à une autre et contribue à accroître une évaporation, déjà très vive. La prédominance des vents d'ouest en hiver, permet l'arrivée des nuages chargés d'air frais générant l'essentiel des précipitations du nord du pays. Tandis qu'en été, les vents provenant du nord-est et surtout du sud provoquent un assèchement de la végétation. En été, le sirocco, un vent extrêmement chaud et sec, souffle du Sahara vers le nord. Au sud, l'aridité du climat est accentuée par des vents de sable parfois très violents (simoun).

1.3.4. Les étages bioclimatiques :

Les domaines bioclimatiques montrent une diversité climatique et bioclimatique qui favorise une grande diversité biologique. Les caractères édaphique et climatique déterminent la répartition de la végétation naturelle et les potentialités agricoles de différentes zones. Ainsi, tous les étages et sous-étages bioclimatiques sont présents et caractérisent l'Algérie, depuis l'humide au nord jusqu'au saharien au sud et depuis le froid jusqu'au chaud pour les variantes thermiques.

Selon la classification bioclimatique d'Emberger (1955) et Sauvage (1963), les cinq étages du bioclimat, largement adoptée en région méditerranéenne, ont été définis pour l'Algérie : Saharien, Aride, Semi-aride, Sub-Humide et Humide. La répartition bioclimatique montre que l'influence méditerranéenne s'atténue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer. Le gradient d'aridité s'observe également d'est en ouest.

Par ailleurs, en allant du nord de l'Algérie vers le sud, on traverse différents paysages, en passant des forêts, maquis et matorrals vers les steppes semi arides et arides puis vers les écosystèmes désertiques (Khelifi. 2002, Derouiche. 2007).

Suivant les tranches de cumul pluviométrique annuel, on distingue :

- Les zones à pluviométrie dépassant **900 mm constituent** l'étage humide que l'on retrouve dans les régions nord-est, dominé en altitude par les forêts des *Abies numidica*, *Populus tremula*, *Cedrus atlantica*, *Quercus suber*, *Quercus faginea*, *Quercus afares*);



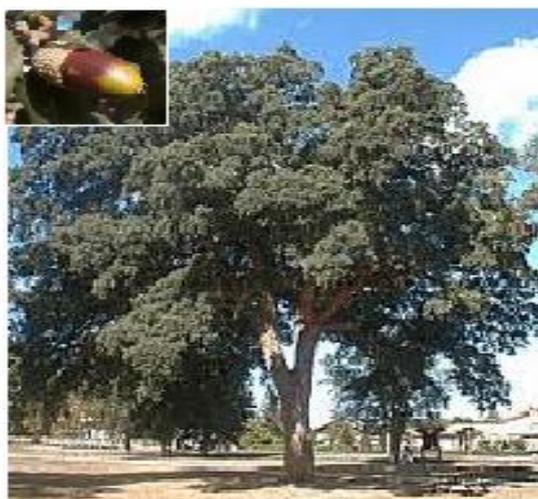
1) *Abies numidica*



2) *Populus termula*



3) *Cedrus atlantica*



4) *Quercus seber*



5) *Quercus faginea*



6) *Quercus afares*

Figure 1.1 : Exemples de végétation qui occupe la 1^{ier} zone.

- Les zones à pluviométrie entre **600 et 900 mm** correspondent à l'étage subhumide qui couvre la partie septentrionale d'ouest en est de l'Atlas Tellien où se développent les forêts à *Quercus rotundifolia* et *Pinus halepensis* ;

1) *Quercus rotundifolia*2) *Pinus halepensis*

Figure 1.2 : Exemples de végétation qui occupe la 2^{ème} zone.

- Les zones à pluviométrie entre **400 et 600 mm** sont les zones du semi-aride supérieur qui correspondent aux forêts, maquis et matorrals plus ou moins dégradés des sommets et versants Nord de l'Atlas Saharien. Les *Quercus rotundifolia*, *Callitris articulata* (le thuya) et l'olivier-lentisque sont les plus représentés au nord-ouest, le *Pinus halepensis* se trouve en altitude ;



1) Olivier-lentisque

2) *Callitris articulata*

Figure 1.3 : Exemples de végétation qui occupe la 3^{ème} zone

- Les zones à pluviométrie entre **300 et 400 mm** correspondent à la zone sub-steppe, caractérisée par la disparition des espèces forestières et l'apparition des espèces steppiques telles que l'armoise (*Artemisia herba alba*), l'alfa (*Stipa tenacissima*) et le sparte (*Lygeum spartum*). Dans cet étage, les parcours sont en compétition avec la céréaliculture au niveau des dépressions ;

1) *Artemisia herba Alba*2) *Stipa tenacissima*3) *Lygeum spartum*

Figure 1.4 : Exemples de végétation qui occupe la 4^{ème} zone.

- Les zones à pluviométrie entre **100 et 300 mm** : cette tranche pluviométrique correspond à la région des steppes méridionales arides et présahariennes qui sont caractérisées par une réduction importante du couvert végétal donnant lieu à des parcours médiocres sur des sols squelettiques et ayant atteint un seuil de dégradation très avancé ;

- Les zones à pluviométrie faible, inférieure à **100 mm** : correspond à la zone sud de l'Atlas Saharien, la végétation est contractée et localisée dans les lits d'oueds. C'est une végétation hygrophile et spasmophile fortement adaptée aux conditions xériques et qui présente un très fort taux d'endémisme. On retrouve des pâturages à base d'espèces graminéennes à *Aristida pungens* et *Panicum turgidum* et d'arbustes fourragers tels que les nombreux acacias.

1) *Aristida pungens*2) *Panicum turgidum*

2) Acacias

Figure 1.5 : Exemples de végétation qui occupe la 6^{ème} zone

Le tableau suivant représente la classification d'Emberger (1955) des étages bioclimatiques en Algérie et sa répartition sur le territoire.

Tableau 1.1 : Les étages bioclimatiques en Algérie

Étages bioclimatique	Pluviométrie Annuel (mm)	Superficie (ha)	% de la superficie total
Humide	>900	773 433	0,32
Sub-humide	600-900	3401 128	1,42
Semi aride	300-600	9814 985	4,12
aride	100-300	11 232 270	4,17
Saharien	<100	212 766 944	89,43

1.3.5. Les ressources en sols :

La nature du sol en Algérie est à structure très variable. Pour les trois grands ensembles géographiques, les principales caractéristiques pédologiques sont les suivantes :

Dans les zones telliennes : on rencontre des sols avec une structure fragile offrant une faible résistance à l'érosion.

En zone steppique : on trouve une mosaïque des sols plus évolués et très souvent dégradés et pauvres en matière organique.

En zone saharienne : (du sud de l'Atlas saharien jusqu'au Tassili), on découvre de grandes unités géomorphologiques où les sols exploitables pour l'agriculture saharienne sont très réduits et surtout squelettiques et pauvres en humus.

La répartition des sols en Algérie présente un zoning qui reflète celle du climat. Cependant, elle est largement modifiée par l'influence de la nature des roches mères, du relief, de l'eau, de la végétation, ainsi que des facteurs biotiques et anthropogènes. On rencontre :

- Les sols bruns lessivés et sols bruns calcaires dans les bioclimats humides et sub-humides (Luvisols, Calcisols) ;
- Sols châtaîns et bruns iso humiques, souvent avec des accumulations calcaires en profondeur, dans les bioclimats semi-arides et arides (Kastanozems, Calcisols) ;
- Sols gris subdésertiques, ainsi que des sols salins aux bioclimats arides et désertiques (Regosols, Solonchaks).

1.3.6. Hydrologie :

Le caractère si typique des écoulements de la région a fait que le terme Oued est passé dans le vocabulaire géographique. Il s'applique aux cours d'eau à écoulement irrégulier qui sont la plupart du temps à sec ou à faible écoulement parcouru en intermittence par des crues violentes et abondantes.

Durant la saison humide constituée de l'hiver et du printemps, les apports hydriques sont conséquents. Alors qu'en saison sèche, le déficit est sévère, voir jusqu'à rupture de l'écoulement.

Certains oueds telliens sont pérennes et maintiennent des écoulements en été. Ce sont, généralement, des oueds qui drainent de vastes bassins versants. La masse d'eau, infiltrée dans les sols est restituée progressivement au cours d'eau pour compenser l'absence de précipitations estivales et la forte évaporation. En effet, pour le plus grand bassin versant de l'Algérie (30 000 km²), à savoir le Chéelif, des débits très faibles à peine supérieurs à 1 m³/s soutiennent les étiages. Alors que le débit moyen oscille entre 7,5 et 33,5 m³/s (données relatant à la période 1952-1957). Alors que les débits de pointe se situent entre 134 et 1560 m³/s. Les fortes précipitations et les chutes de neige du massif de Collo à l'est, soutiennent les étiages de L'oued Djendjen drainant un bassin versant d'une superficie de 4118 km² (Talbi.E, 2008).

Les cours d'eau de petite taille n'ont d'écoulements pérennes que grâce à des circonstances particulières. Comme pour les oueds de Maffrouch (bassin-versant : 90 km²) et Chouly (178 km²) à l'ouest du pays, où l'étiage est soutenu par les sources résurgentes du cause de Tlemcen.

Les bassins versants de moyenne taille présentent des crues aussi impressionnantes, comme celle de l'Oued Sébaou (1 512 km²) atteignant le débit de pointe de 1 580 m³/s en 1953 et oued Hamiz (139 km²) 660 m³/s en 1954. Cette absence de pondération qui résulte directement de l'irrégularité des précipitations fait que les trois quarts des débits annuels s'écoulent en quelques mois et que les débits annuels varient d'une année à l'autre de façon considérable. Exemple, entre 1952 et 1957, les apports annuels d'Oued Fodda (800 km²) a atteint deux extrêmes : 30 millions et 159 millions de m³, une opposition analogue au contraste climatique distingue les oueds du Tell occidental de ceux du Tell oriental. Ces derniers écoulent des volumes plus considérables en raison de l'abondance des précipitations

et de l'aspect montagneux plus important dans les bassins versants orientaux. On remarquera que la Mekerra et l'oued El Hammam quoique situés dans le Tell occidental plus sec, ont des basses eaux moins prononcées en été où les étiages sont soutenus par une restitution prolongée de l'eau infiltrée dans le rebord calcaire des Hautes Plaines (Talbi.E, 2008).

Par ailleurs, il est montré que l'irrégularité s'accroît au fur et à mesure que l'aridité croît.

Dans les grands bassins versants l'écoulement devient permanent après la jonction d'affluents drainant d'importantes surfaces bien arrosées par les précipitations. L'exemple le plus expressif est celui du Chélif où à Boughzoul se réunissent Nahr Ouassel qui longe la bordure sud-tellienne, et Oued Touil qui prend sa source dans Djebel Ammour. Les crues du Nahr Ouassel débouchent annuellement dans le barrage réservoir de Boughzoul alors que celles de l'Oued Touil n'y parviennent pas toujours.

1.4. Bassins versants d'étude :

1.4.1. Définition d'un bassin versant :

Un bassin est défini comme une entité topographique et hydrographique dans laquelle se produisent des entrées d'eau sous forme des précipitations ou en apports souterrains issus d'autres bassins. Aux écoulements où ils sont associés les matières mobilisées par l'érosion, ces écoulements chargés en sédiments s'effectuent suivant un système de pentes et de drains naturels en direction d'un exutoire ou embouchure du cours d'eau collecteur (Bravard & Petit, 2000). Le fonctionnement d'un cours d'eau est directement lié à son bassin versant et au régime climatique auquel il est soumis. Les caractéristiques de la pluie, du bassin versant et de la rivière elles même déterminent donc l'importance de la variation de débit de la crue.

En période des pluies, une partie de l'eau s'infiltré dans le sol. Lorsque la capacité de rétention est atteinte, les eaux de pluie ruissellent sur les pentes de bassin versant jusqu'à l'exutoire (rivière, fleuve ou Oued) pendant une durée plus ou moins longue, appelée temps de concentration. Ce dernier varie, principalement, en fonction des deux paramètres:

- La topographie du bassin : plus les pentes sont fortes et plus le ruissellement est rapide, réduisant ainsi le délai entre la pluie et la crue.

- L'occupation des sols : la déforestation, les pratiques agricoles, l'urbanisation réduit les capacités d'infiltration des sols et peuvent contribuer à augmenter la fréquence et l'intensité des crues.

Les bassins versants de l'Algérie septentrionale constituent un domaine méditerranéen particulièrement riche en forme d'érosion. La plupart des oueds drainent des bassins versant inscrit dans un relief jeune et accidenté où la diversité des terrains dépend d'une structure géologique très complexe (Bourouba, 1993). Dans le Tell, les versants façonnés dans les couches marneuses crétacés supérieurs, ou près du littoral dans les strates argileuses tertiaires favorisent l'extension spatiale des formes actuelles de ravinement et de mouvement de masse (Kouri & Vogt 1996).

Dans les secteurs argileux et marneux, la roche-mère affleure sur de grandes superficies, en particulier, sur les versants dont les pentes dépassent le seuil de 25%. Par ailleurs, et dans la plus part des versants, particulièrement dans les hautes plaines orientales et les bassins côtiers constantinois occidentaux, la dessiccation l'emporte souvent sur la pédogénèse offrant un paysage de crête aigues et des collines dénudées (Bougherara, 1986, Bourouba, 1988).

Cependant, malgré l'extension actuelle de l'érosion et le seuil dangereux atteint par la dynamique érosive dans les différents bassins versants de l'Algérie septentrionale, la compréhension de ce phénomène se heurte à l'absence ou à l'insuffisance des observations chiffrées ainsi qu'à l'hétérogénéité de celle qui existent au niveau des stations hydrométriques.

1.4.2. Choix des bassins d'étude :

Pour étudier la dynamique des sédiments dans le Nord de l'Algérie, on a choisi quatre bassins versants de différentes caractéristiques. Le choix des bassins est dicté par la disponibilité de l'information notamment des séries longues et fiables des mesures des débits liquides et concentrations (fig. 1.6). Le choix est porté sur les bassins de : Oued Isser contrôlé à la station de Remchi (code 16 ; fig. 1.6) pour la partie occidentale, Oued Isser à la station Lakhdaria (code 09 ; fig. 1.6) au centre, la partie orientale est représentée par Oued

El.Kebir à la station d'El Ancer (code 10 ; fig. 1.6) et celle de Khemakhem à Oued Saf-Saf dans le bassin versant de côtières Constantinois (code 03 ; fig. 1.6).

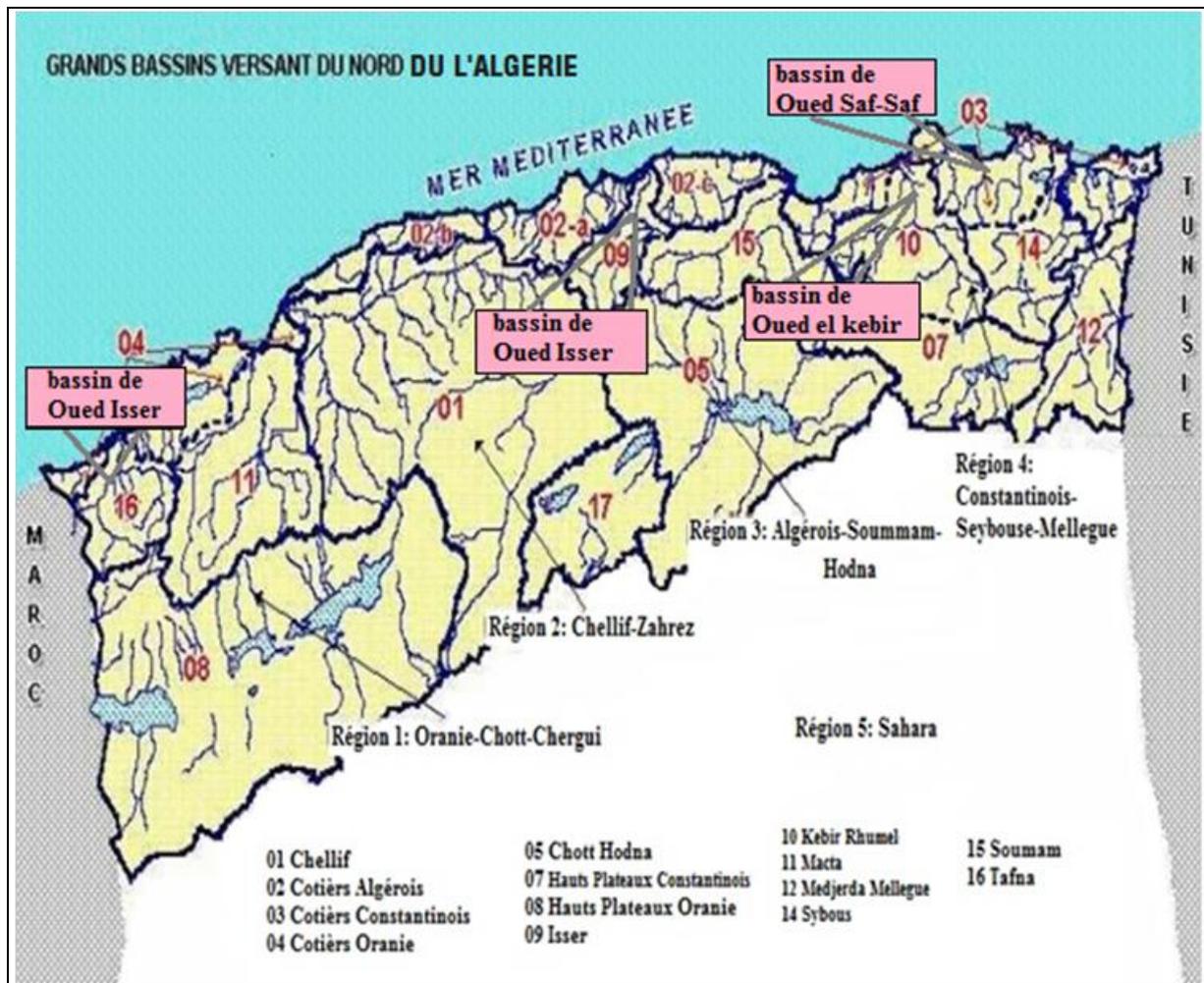


Figure 1.6 : Bassins hydrographiques de l'Algérie.

Dans le tableau 1.2, on résume les principaux paramètres hydro-morphologiques des quatre bassins d'étude.

Tableau1.2 : Principaux paramètres hydro-morphologique des quatre bassins d'étude

Paramètres	Remchi Figure1.2	Lakhdaria Figure1.3	El Ancer Figure1.4	Khemakhem Figure1.5
Code de la station	16-07-03	09-05-01	10-07-01	03-09-01
Oued	Isser	Isser	El.Kebir	Saf-Saf
X	122,90	579,10	807,60	878,95
Y	208,85	369,75	395,45	370,30
Superficie (km ²)	1935	3615	8735	322
Périmètre (km)	180	270	375	81
Altitude maximal (m)	1616	1810	1729	1220
Altitude minimal (m)	85	90	15	206
Altitude moyenne (m)	720	710	560	628
Densité de drainage (km/km ²)	2,6	3,6	3,1	3,4
Indice de compacité	1,14	1,26	1,12	1,26
Indice de pente de roche	0,16	0,11	0,12	0,175
Coefficient de torrentialité	0,16	29,9	13,1	22,1
Longueur du rectangle équivalent (km)	54,5	98,2	65,8	296
Longueur de thalweg principal (km)	126	200	87	24

1.4.2.1. Bassin d'Oued Isser à la station de Remchi :

Le bassin versant d'Oued Isser à la station de Remchi, s'étend sur une superficie de 1935 km² (Fig.1.7). Il est situé dans la partie nord du bassin versant de la Tafana. Oued Sekkak prend naissance sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen à la source d'Ain Rhannous. C'est un affluent rive gauche de Oued Isser (lui-même affluent rive droite de la Tafna) avec lequel il conflue au nord de Ain Yousef pour donner l'oued Isser principal.

Les sols du bassin ont une tendance généralement alcaline (environ 1140 km²) subdiviser en 04 groupes : les terres de nature alluvionnaire, les terres calcaires brunifiés, les terrains constitués par des roches calcaréo-gréseuses ou marno-gréseuses et les terrains squelettiques (grés calcaire, dolomies ou des carapaces calcaires), la superficie est occupée par un couvert végétal insuffisant (couvert forestier dégradé ou mort).

Le reste du bassin est caractérisé par un massif jurassique rocheux, calcaire et dolomitique admettant une maigre couverture forestière. Les grés de Boumediene sont caractérisés par l'abondance de *cistus daniferus* et par *quercus suber* qui constituent les forêts d'Hafir et Zarifet. Les marnes kimméridgiennes et miocènes et les alluvions quaternaires sont occupées par les céréales et les prairies naturelles. Les broussailles occupent une petite surface dans le bassin, concentrées dans la région de la commune de Ain Fezza et au Djebel Ain El Hout (Bouanani, 2004).

Le bassin est soumis à un climat de montagne, pluvieux et à amplitude thermique faible avec des chutes de neiges. Sur les plaines, le climat est sec et relativement chaud avec de forts écarts de températures.

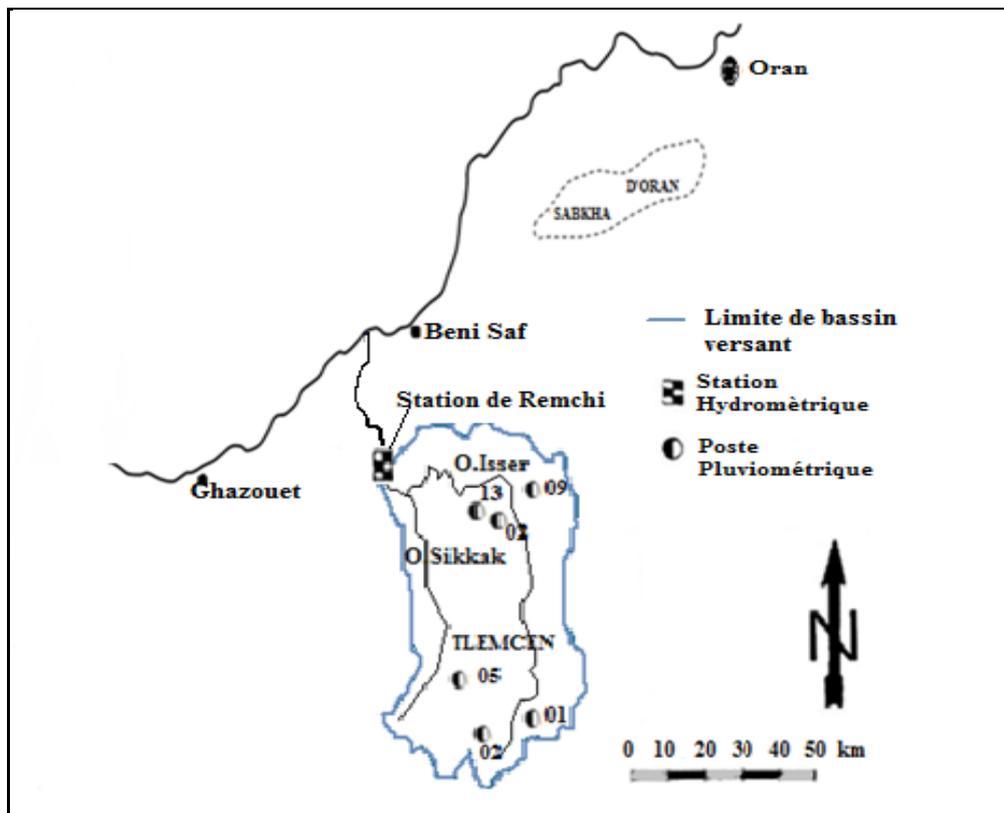


Figure1.7 : Présentation du bassin versant d'Oued Isser à la station de Remchi.

1.4.2.2. Bassin d'Oued Isser à la station de Lakhdaria :

Le bassin versant d'Oued Isser à la station de Lakhdaria, est de type montagneux. Il se trouve à une altitude moyenne de 710 m. Oued Isser draine une superficie de 3615 km² (fig.1.8) et alimente le barrage de Beni Amrane d'une capacité de 640 million de m³. Du nord vers le sud, le relief prend de l'ampleur où l'on note une cote maximale de 1810m.

Oued Isser collecte les eaux de la plaine d'Aribs près de Bouira. Il s'écoule d'abord du nord au sud, puis change de direction à la traversée des gorges de Lakhdaria. Celles-ci sont situées dans la dépression synclinale rattachée au dôme du massif de Béni Khalfoun qui culmine au nord-est à la forêt de Tigrimount à 1028 m. Le cours inférieur de la vallée de l'Isser représente un oued encaissé dans sa basse terrasse et décrit plusieurs méandres.

Le bassin versant de l'Isser est formé en majeure partie de roches tendres : marnes et argiles, situées en pente favorisant une érosion hydrique importante. Un couvert végétal peu dense localisé au centre, représente 20% de la superficie totale du bassin versant. Le reste du bassin, soit 80%, est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères. Au bas Isser, on rencontre essentiellement les cultures annuelles, et sur des superficies réduites l'arboriculture. La nature tendre des matériaux (marnes et argiles) et le régime de l'écoulement irrégulier ont contribué à la formation d'un réseau hydrographique dense de type arborescent (Larfi & Remini 2006).

Sur les hauteurs, le bassin est soumis à un climat de montagne, pluvieux et à amplitude thermique faible avec des chutes de neiges. Sur les plaines, le climat est sec et relativement chaud avec de forts écarts de température.

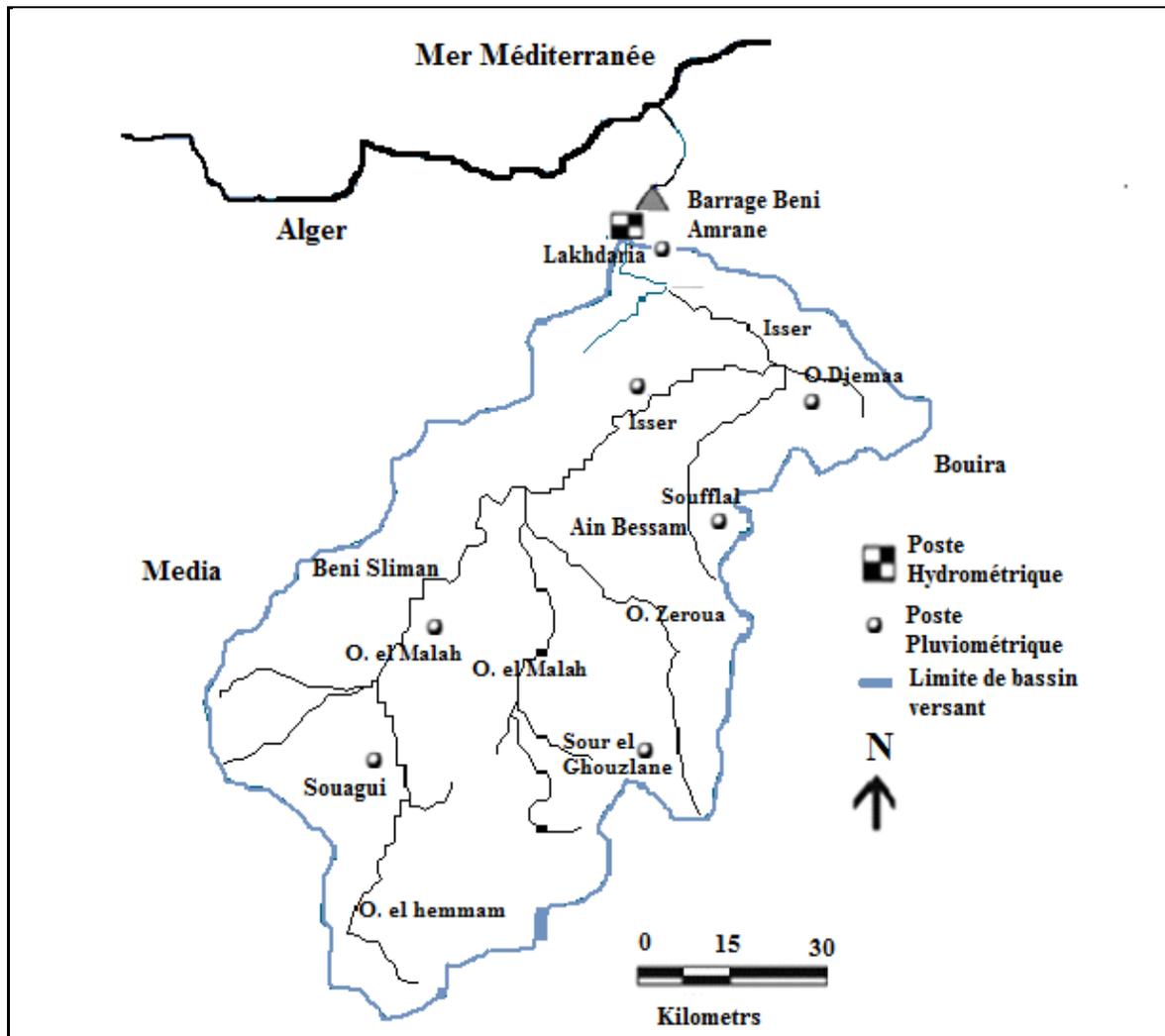


Figure1.8 : Présentation du bassin d'Oued Isser à la station Lahkdaria.

1.4.2.3. Bassin d'oued El Kebir:

Le bassin versant d'oued El Kebir, à la station d'El Ancer a une superficie de 8735 km² (fig.1.9). C'est un sous bassin de Kébir Rhumel. Oued El.Kebir s'inscrit dans un contexte géographique qui présente de l'amont à l'aval des aspects nettement contrastés. Au relief plat et dénudé à chevelu hydrographique assez lâche des hautes-plaines, succèdent de basses collines telliennes aux vallées encaissées, lesquelles se prolongent au nord par des massifs montagneux (massifs anciens de la petit Kabylie) affectés par une densité de drainage importante (Mebarki 1982).

Le bassin d'étude fait partie de l'ensemble géologique de l'Atlas Tellien, zone plissée

Alpine de l'Afrique du Nord caractérisée par sa complexité lithologique et structurale. Poussée vers le Sud lors de la compression Alpine, les sédiments marneux secondaires et éocènes du sillon Tellien ont fourni plusieurs ensembles structuraux, tectoniquement empilés les uns sur les autres (Hannouche & Nechem 2010):

- (a) l'autochtone de la bordure occidentale du Djebel Edough occupe la position structurale la plus basse ;
- (b) plus haut la zone para-autochtone du Djebel Safia constituée de terrains secondaires surmontés par des ensembles allochtones dont le plus bas est celui des chistes métamorphiques du Paléozoïque inférieur que surmonte une couverture sédimentaire Oligocène ;
- (c) la position supérieur est occupée par du flysch Albo-Aptien et Paléogène recouvert lui-même par du flysch à microbrèches présentant une extension limitée ;
- (d) la partie supérieure des ensembles Allochtones est la nappe Numidienne largement développé en Algérie du Nord et que l'on attribue au sommet de l'Oligocène et à l'Aquitaniens.

Le climat de la région est classé dans la zone subtropicale avec un hiver pluvieux et un été chaud. L'humidité relative élevée se localise essentiellement en altitude en période froide et diminue en période chaude, elle varie de 65% à 75%.

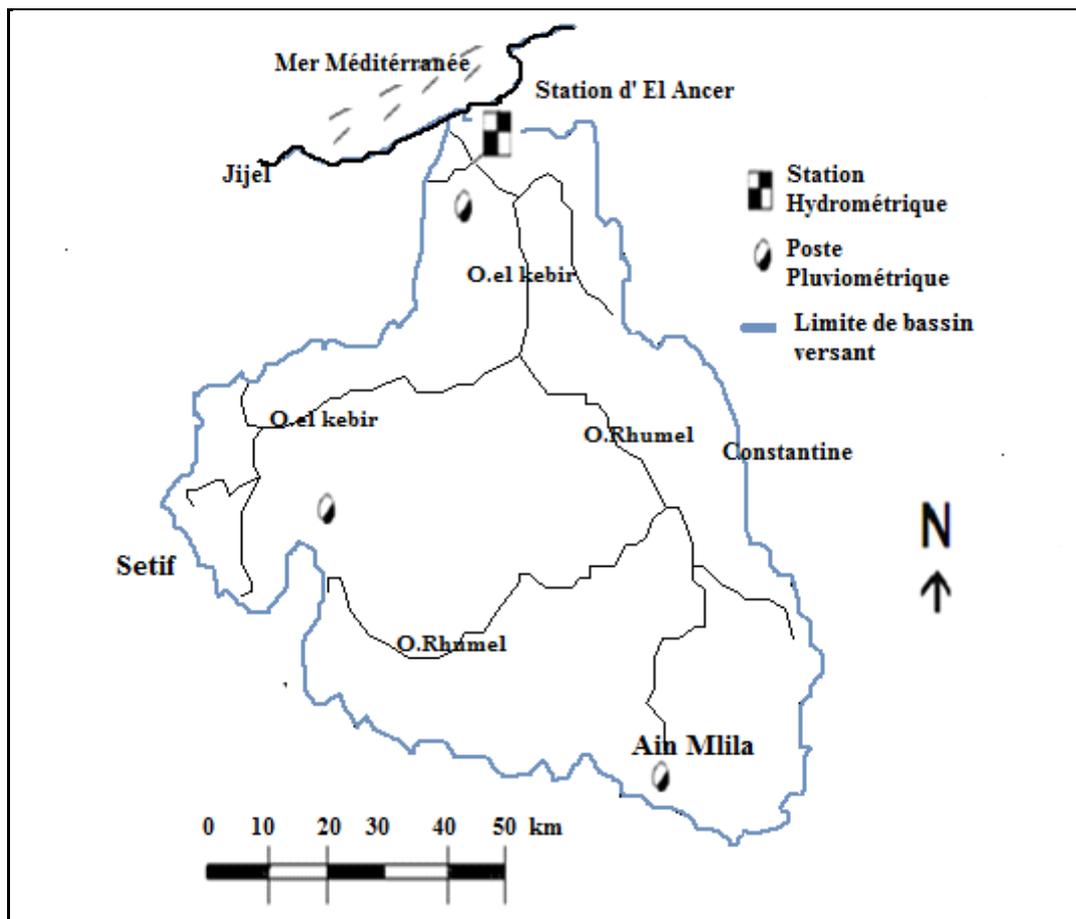


Figure1.9 : Présentation du bassin versant Oued El Kebir à la station d'El Ancer.

1.4.2.4. Bassin d'Oued Saf-Saf :

Le bassin versant de Oued Saf-Saf à la station de khemakhem , s'étend sur une superficie de 322 km² (fig.1.10). Il appartient au bassin côtier constantinois centre et se situe entre le bassin de Oued Guebli à l'ouest et celui de Oued Kebir à l'est et il alimente le barrage de Zerdezas d'une capacité de 32 hm³.

La géologie de la région du bassin d'Oued Saf Saf, est constituée par un empilement de nappes. Selon la carte géologique (Carte Géologique, INGA, 1962), du nord au sud, on trouve le socle kabyle et la dorsale kabyle, la série des Flysch (Mauritanien, Massylien, Numidien et Ultra Tallien), la série de grès numidiens et la nappes néritique du constantinois.

Le bassin versant de Saf-saf est soumis à un climat méditerranéen, appartenant au domaine humide à subhumide, caractérisé par des irrégularités mensuelle et annuelle des précipitations. La température moyenne annuelle est modérée, elle est de l'ordre de 18°C.

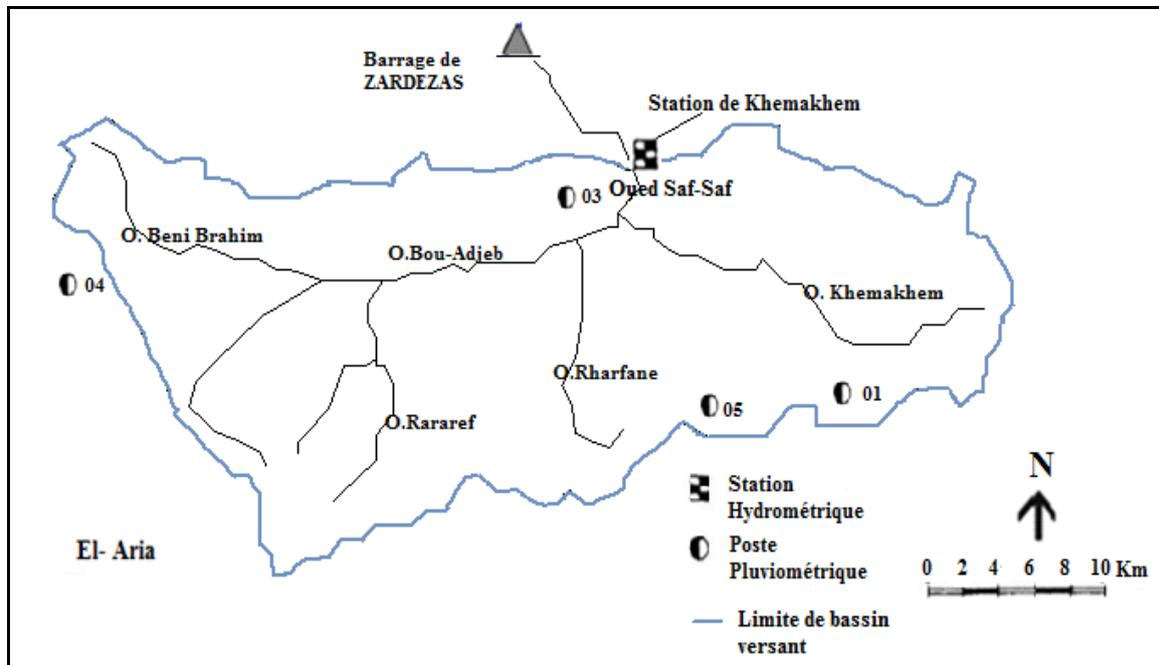


Figure1.10 : Présentation hydrologique du bassin d'Oued Saf Saf (Station Khemakhem).

CHAPITRE II
HYSTERESIS DE FORME SIMPLE

2. Chapitre

Hystérésis de forme simple

2.1. Introduction

Dans l'écoulement fluvial, la concentration des Matières Solides en Suspension (MES) varie considérablement aussi bien à l'échelle saisonnière qu'événementielle. La réponse temporelle des concentrations est fonction de l'évènement hydrologique lui-même, mais aussi, du temps d'arrivée de l'évènement le long de l'année (Tardy & Probst 1985 ; Inman & Jentins 1999 ; Rovira & Batalla 2006). Les études montrent que l'intensité du flux des sédiments dépend des caractéristiques du bassin versant comme la lithologie, la topographie et l'occupation du sol (Williams 1989 ; Asseleman 1999 ; Hudson 2003) ainsi que des actions anthropiques telles que l'agriculture, la déforestation et la construction des barrages (Walling & Fang 2003 ; Milliman & Syvitski 1992 ; Walling 2006). Récemment, les recherches montrent aussi l'influence du changement climatique sur la production des sédiments (Ludwig et Probst 1998 ; Syvitski 2003 ; Syvitski et al 2003 ; Megnounif & Ghenim 2013). En ce sens, Ludwig et al. (1998) montrent que le transport des MES est fortement influencé par la densité des populations et les pratiques culturelles dans un bassin.

Les caractéristiques du bassin versant combinées avec la variabilité du climat et les actions anthropiques causent des décalages entre la concentration, C , et le débit liquide, Q . De ce fait, la relation C - Q est souvent non synchrone et produit des hystérésis. En dehors de la courbe simple, c'est-à-dire absence d'hystérésis Williams distingue cinq formes d'hystérésis : (hystérésis positive, hystérésis négative, courbe simple avec une boucle soit positive soit négative et hystérésis en forme en huit). Dans le présent travail, en plus des six formes citées précédemment, on étudie la forme complexe (courbe simple plus plusieurs boucles). L'étude des hystérésis en formes simples (courbe simple, hystérésis positives, hystérésis négative et courbe simple plus une boucle) font l'objet de ce chapitre. Ces formes sont produites par des courbes mono-pics, c'est-à-dire les variations du débit (respectivement la concentration) en fonction du temps présentent un seul pic. Le reste des formes, dites complexes, c'est-à-dire,

hystérésis en forme en huit ou bien courbe simple combinais avec plusieurs boucles feront l'objet du troisième chapitre.

L'étude est menée sur les quatre bassins versants décrit dans le 1^{er} chapitre, à savoir : le bassin d'oued Isser à l'ouest, bassin d'oued Isser au centre et bassin d'oued Saf-Saf ainsi que le bassin d'oued El Kebir pour représenter l'est algérien. L'objectif est d'analyser le mode d'évolution de la charge solide C en fonction des débits liquides Q durant différents événements de crue. Une classification détaillée des différents types d'hystérésis est abordée. Chaque type d'hystérésis est expliqué par la forme, l'énergie et les principaux processus responsables de la dynamique des sédiments.

2.2. Donnée de mesure :

Notre étude s'appuie sur des données instantanées des débits liquides et des concentrations en MES mesurés aux stations de :

- Oued Isser, à la station de jaugeage Lakhdaria, pour une période de 30 ans allant de septembre 1971 à août 2001,
- Oued Isser , à la station de jaugeage Remchi, pour une période de 10 ans allant de Septembre 1989 à Août 2001 (exception de l'année sept 1996 / Aout 1997),
- Oued El Kebir, à la station de jaugeage El Ancer, pour une période de 8 ans allant de Septembre 1978 à Août 1986,
- l'oued Saf-Saf ,à la station de jaugeage Khemakhem, pour une période de 5 ans allant de Sept 1971 Août 1972 ; Sept 1979 Août 1981 ; Sept 1983Août 1984.

Les valeurs utilisées sont mesurées et fournie par l'A.N.R.H « Agence Nationale des Ressources Hydriques ». Les valeurs des débits liquides, Q (m^3/s), sont calculées au moyen de la courbe de tarage à partir de la lecture des hauteurs d'eau faite sur une échelle limnimétrique d'une part et le dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur, d'autre part. A chaque lecture de hauteur d'eau, on prélevait sur la rive de l'Oued un échantillon d'eau chargée au moyen d'un conteneur. La boue recueillie sur un papier-filtre est pesée après séchage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Ce qui permet de déduire, C (g/l), la concentration de la charge solide en suspension.

2.2.1. Selection des événements :

Toute élévation du niveau d'un cours d'eau est appelée crue lorsqu'elle a pour cause un apport important en eau consécutif à un événement pluvieux ou à la fonte des neiges. Pour certains auteurs, les crues sont des débits égaux ou supérieurs à un certain multiple du module annuel (3 à 5 fois le module). Selon Rémeniéras (1986), une crue annuelle est le débit le plus fort observé dans l'année.

Dans ce travail on considère une crue toute élévation du débit supérieur au débit moyen annuel et/ou les concentrations sont supérieures à 0,2g/l (valeur prise arbitrairement), une crue peut durer quelque seconde mais aussi elle peut durer plusieurs jours. (Megnounif et al 2013)

2.3. Classe 1: Relation en courbe simple :

2.3.1. Explication par la forme :

La concentration évolue en fonction du débit liquide sous forme de courbe simple lorsque le pic de la concentration et celui du débit liquide coïncident. Dans ce cas, la concentration des sédiments et le débit liquide sont étroitement liés. Ils varient de manière synchronique et proportionnelle lors de la montée et la descente de la crue.

Pour cette classe on distingue trois sous-classes : linéaire, courbe convexe fléchissant vers le haut et courbe concave fléchissant vers le bas.

2.3.1.1. Courbe Linéaire (ligne droite)

La forme en ligne droite se produit lorsque le pic de la concentration et du débit se produisent simultanément. L'écart et la dissymétrie des deux courbes temporelles, C et Q en fonction du temps $C(t)=f(t)$ et $Q(t)=f(t)$, sont identiques sans pour autant que leur hauteur de crête soit identique (fig. 2.1-a). Dans ce cas là, le débit et la concentration augmentent et diminuent de manière synchrone. Pour cette forme, le rapport C/Q est indépendant du débit (fig. 2.1-b).

La pente de la droite établie est en rapport avec la nature du cours d'eau et sa capacité de transport (Bagnold 1966). Une pente supérieure à 1, indique que le cours d'eau a une forte capacité de transport. Plus la pente est supérieure à 1 et plus la capacité de transport est importante. De même, une pente inférieure à 1 est un signe de faible capacité de transport. Plus la pente est plus petite que 1 et plus la capacité de transport du cours d'eau est faible.

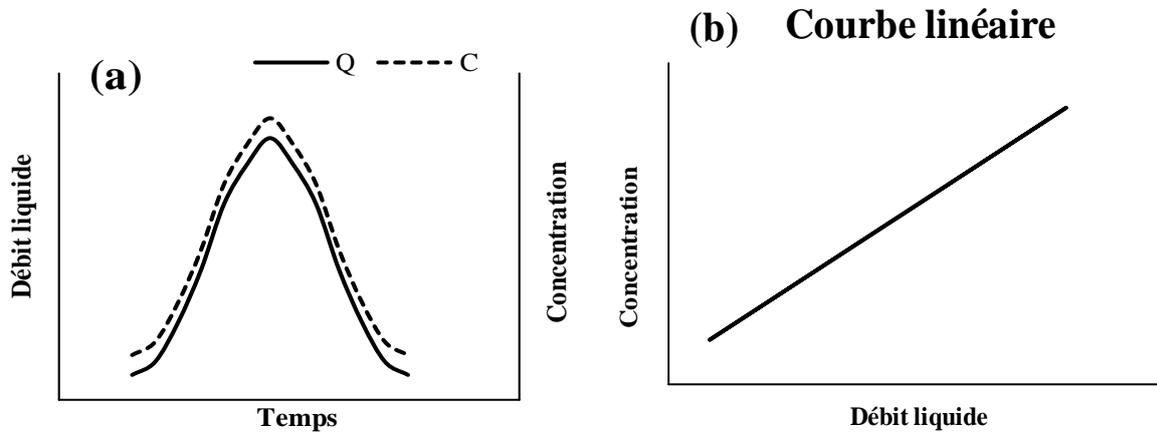


Figure 2.1 : Présentation de la classe I produisant une courbe simple sous forme de droite linéaire, (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps, (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide.

2.3.1.2. Courbe convexe

La relation C-Q montre une courbe fléchissant vers le haut lorsque l'accroissement de la concentration augmente de manière accélérée en fonction du débit liquide (fig. 2.2-a). La courbe temporelle de la concentration à un coefficient d'aplatissement plus accentuée (figure 2.2-b).

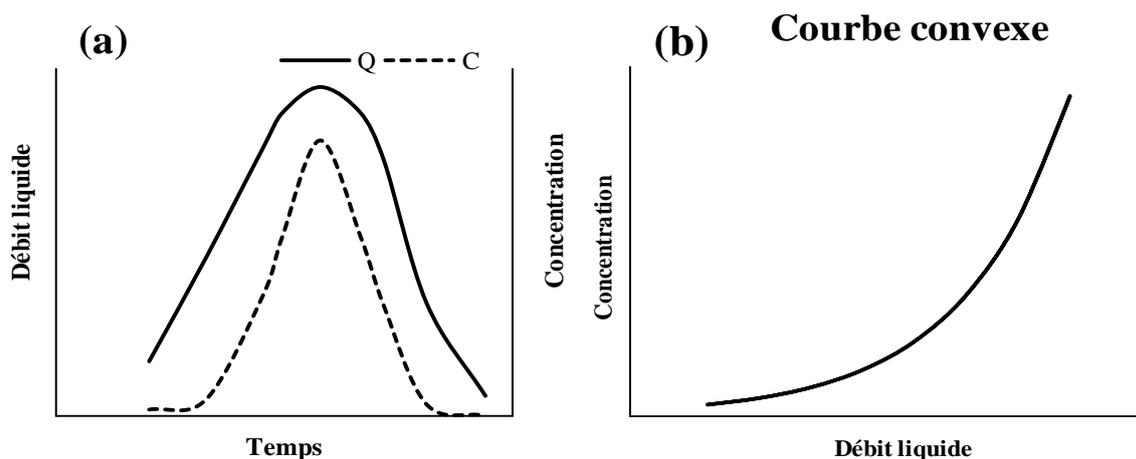


Figure 2.2 : Présentation de la classe I produisant une courbe simple sous forme de courbe convexe, (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps, (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide.

2.3.2. Courbe concave

La relation C-Q montre une courbe fléchissant vers le bas lorsque l'accroissement de la concentration augmente de manière décélérée en fonction du débit liquide (fig. 2.3-a). La courbe temporelle de la concentration à un coefficient d'aplatissement faible (figure 2.3-b).

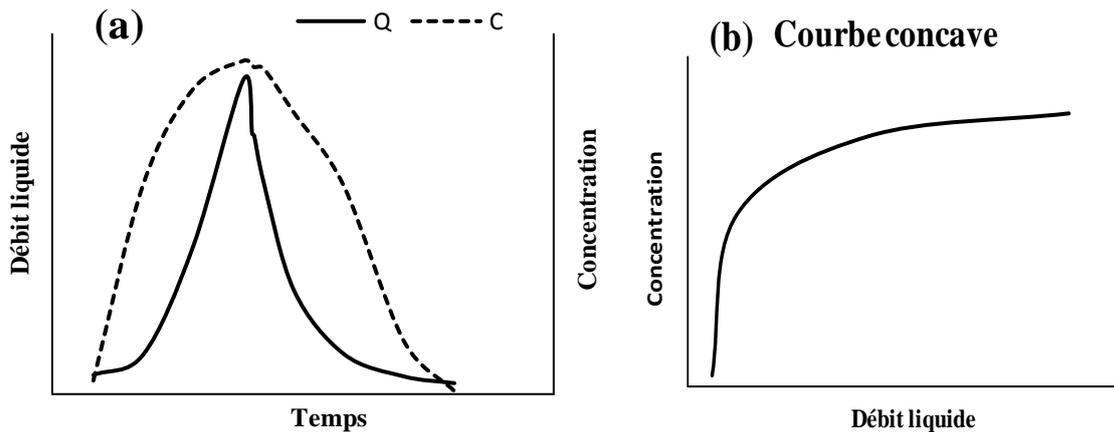


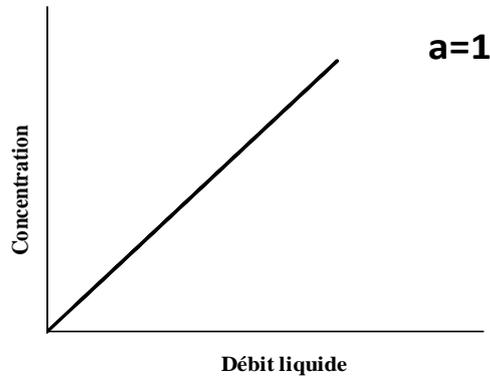
Figure 2.3 : Présentation de la classe I produisant une courbe simple sous forme de courbe concave, (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps, (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide.

2.1.1. Explication par l'énergie:

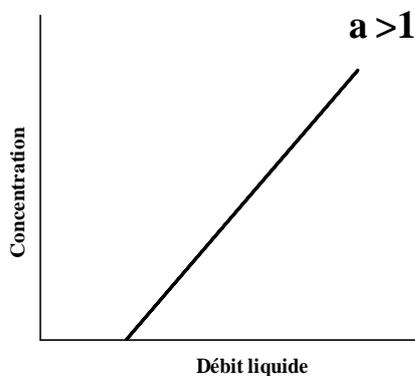
A seuil énergétique égal mesuré lors de la montée et la décrue des eaux, $Q_i=Q_j$, la production des sédiments est la même manifestée par une égalité entre les rapports (C_i/Q_i) (C_j/Q_i) . Quelque soit la pente de la droite, le rapport (C_j/Q_j) est indépendant de l'énergie du cours d'eau. Cependant, dans le cas d'une courbe simple on distingue les cas suivants :

Dans le cas d'une courbe linéaire, la production des sédiments est proportionnelle à l'énergie sauf que selon le type et la configuration du bassin versant. La réponse n'est pas la même d'un bassin versant à fort potentiel érosif (pente $a > 1$) et un bassin versant à faible potentiel érosif (pente $a < 1$).

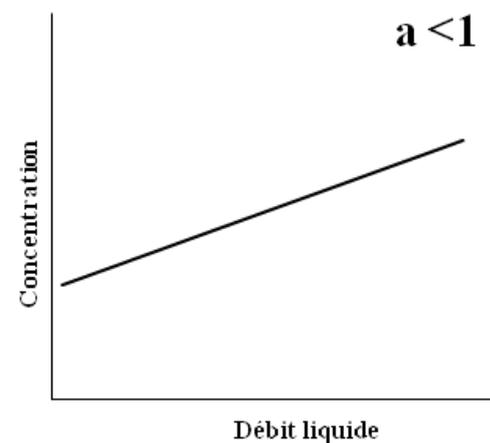
2.1.1.1. Cas d'une droite :



- Pour une pente à proche de 1, l'érosion est modérée.



- Pour une pente $a > 1$, l'érosion est forte. Plus a augmente et plus l'érosion est intense, mais de manière synchrone avec l'énergie de l'eau.



- Pour une pente $a < 1$, l'érosion est faible. Plus le coefficient a diminue et plus l'érosion est faible mais diminue de manière linéaire avec l'énergie.

Figure 2.4 : Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide ayant une forme de courbe simple.

2.1.1.2. Cas d'une courbe non linéaire :

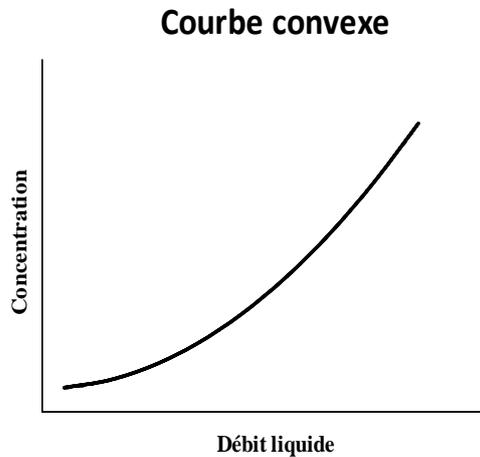


Figure 2.5 : Schématisation de la forme convexe.

- Le cas convexe indique qu'il y a accélération dans la production des sédiments lorsque l'énergie de l'eau augmente. Dans ce cas, à seuil égale $Q_i=Q_j$, on a $(C_i/Q_i) = (C_j/Q_j)$ cependant le rapport (C_j/Q_j) augmente lorsque l'énergie augmente. Parfois, le cas convexe correspond à une combinaison de deux segments ou bien à une courbe et un segment décrivant deux comportements distincts de la capacité de transport du cours d'eau. (fig. 2.5).

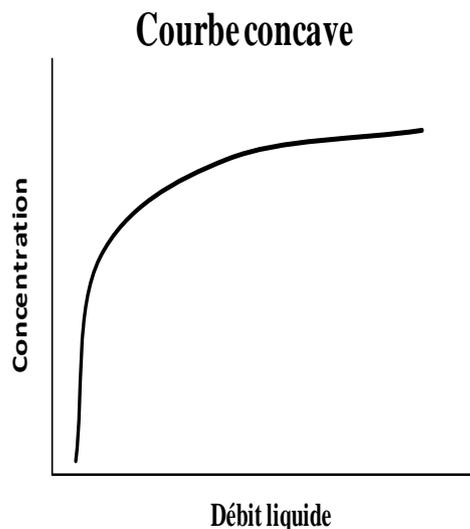
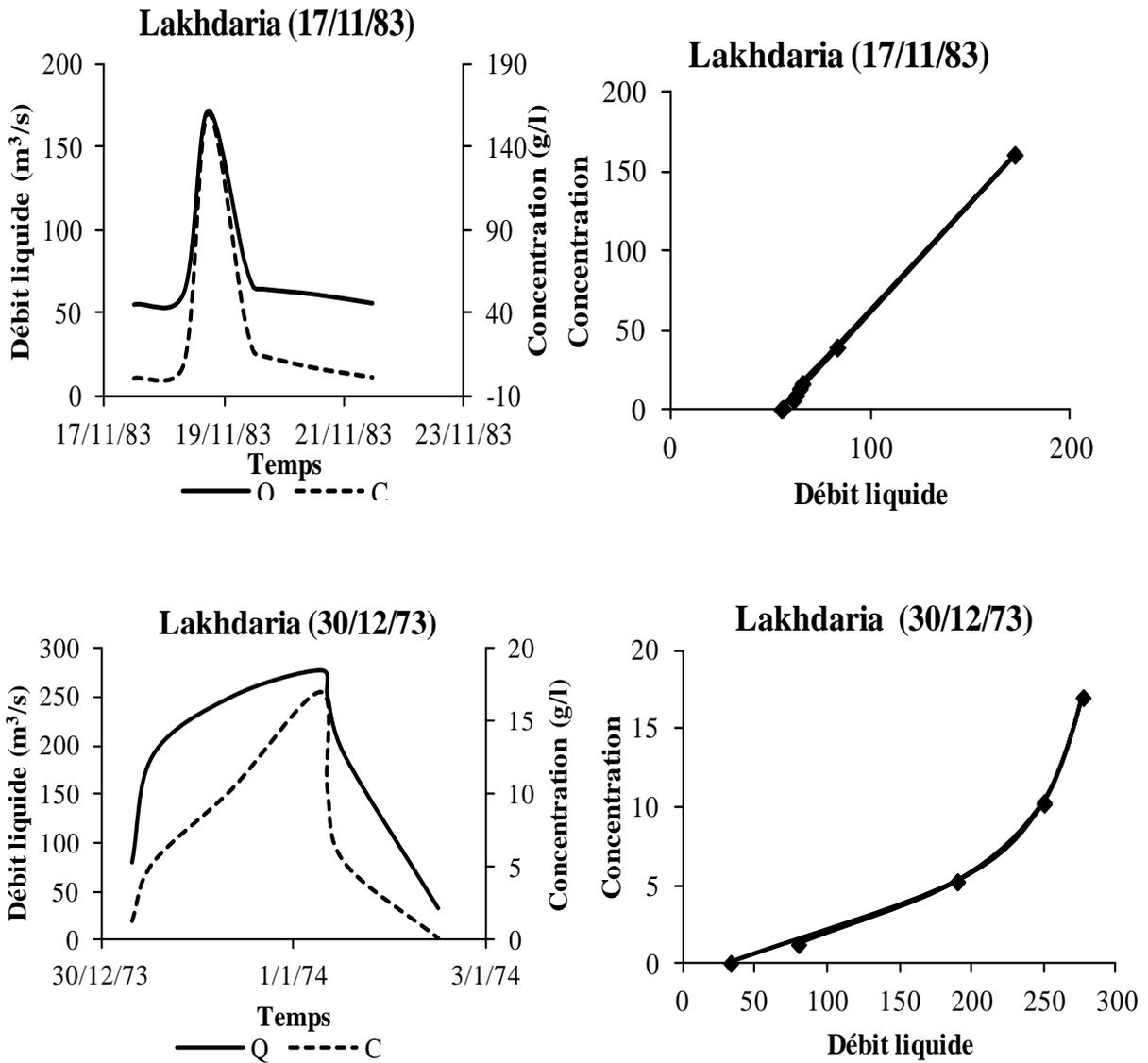


Figure 2.6 : Schématisation de la forme concave.

- Le cas concave indique qu'il y a une décélération dans la production des sédiments lorsque l'énergie de l'eau augmente. Dans ce cas, à seuil égale $Q_i=Q_j$, on a $(C_i/Q_i) = (C_j/Q_j)$ cependant le rapport (C_j/Q_j) diminue lorsque l'énergie augmente. De même que le cas convexe, la forme concave est parfois une combinaison de deux segments ou bien à une courbe et un segment décrivant deux comportements distincts de la capacité de transport du cours d'eau (fig. 2.6).

La (fig.2.7), montre trois exemples d'événements présentant des courbes simples. Les crues observées à la station de Lakhdaria le 17 novembre 1983, le 30 décembre 1973 et le 7 octobre 1999 présentent respectivement une courbe linéaire, une courbe convexe et courbe concave.



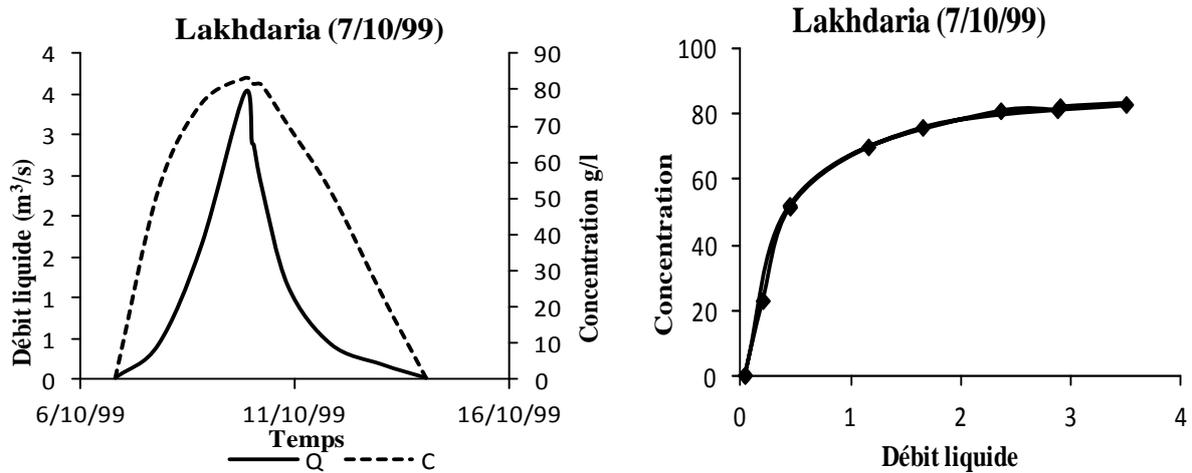


Figure 2.7 : Exemples des événements de crue montrant des relations concentration-débit liquide sous forme de courbes simples : linéaire, convexe et concave.

2.1.1. Principaux processus responsables de l'absence d'hystérésis (courbe simple) :

Durant ces épisodes des crues, le transport des sédiments transportés en suspension est étroitement lié aux débits liquides. Dans ce cas, les sédiments dérivent principalement du réseau de drainage, dues en partie à l'absence des matières facilement mobilisables.

2.2. Classe 2 : hystérésis positive

2.2.1. Explication par la forme :

La forme positive en anglais " clockwise hysteresis " se produit lorsque le pic de la concentration (C_{\max}) est atteint avant le pic du débit liquide (Q_{\max}) (fig. 2.8-a). Ce type d'événement passe par trois phases distinctes marquant l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide (fig.2.8-b).

La 1^{ère} phase est l'ensemble des mesures réalisées avant le pic de la concentration. Elle est marquée par une augmentent synchrone du débit liquide (Q) et de la concentration (C).

La 2^{ème} phase correspond aux mesures réalisées entre le pic de la concentration et celui du débit liquide. Lors de cette phase le débit augmente alors que la concentration est à la baisse.

Durant la 3^{ème} phase, i.e. après le pic (Q_{\max}) le débit et la concentration diminuent de manière synchrone.

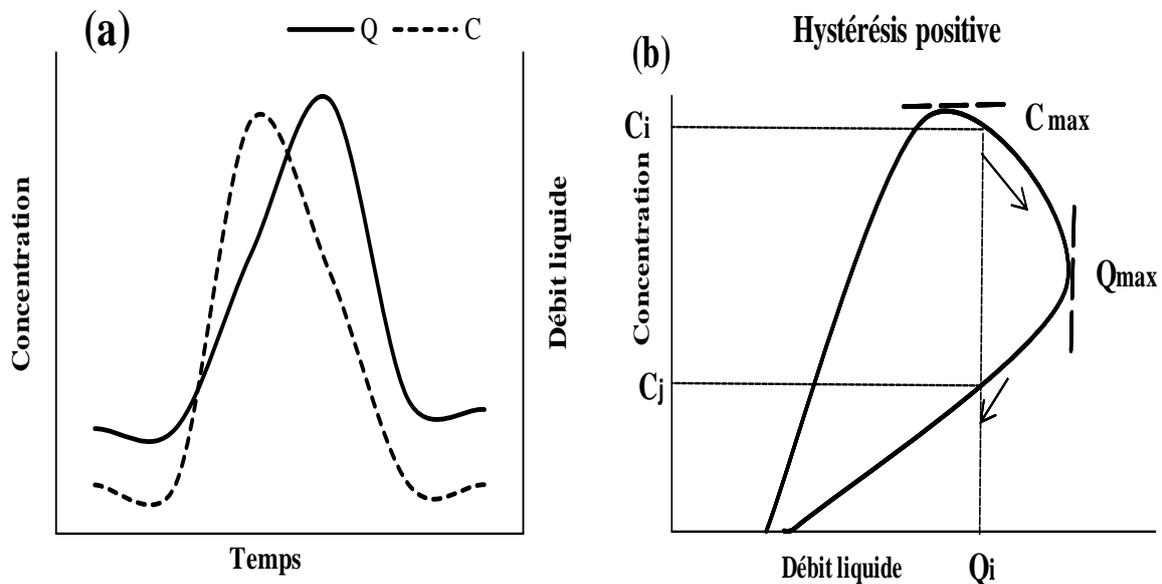


Figure 2.8 : Forme d'hystérésis positive ; (a) Schématisation de l'évolution de débit liquide et de la concentration en fonction de temps ; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide.

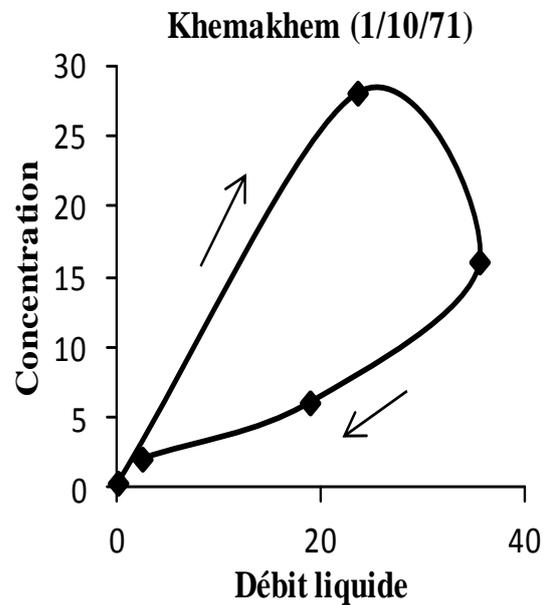
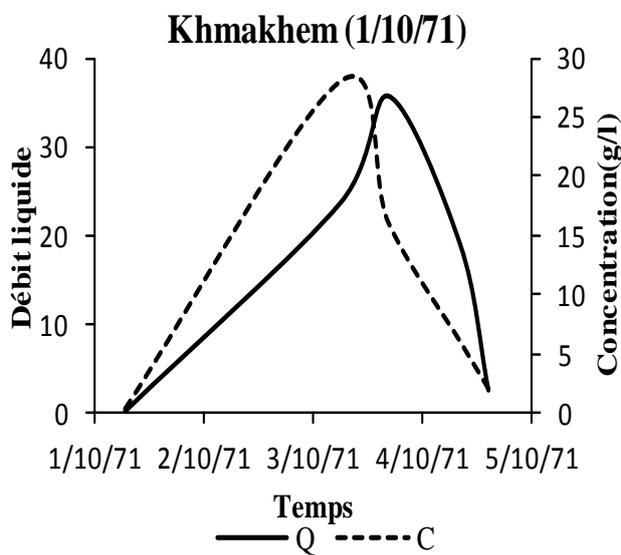
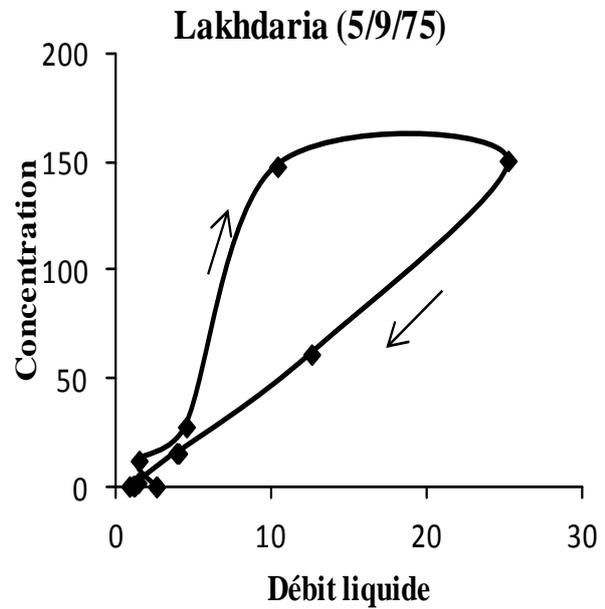
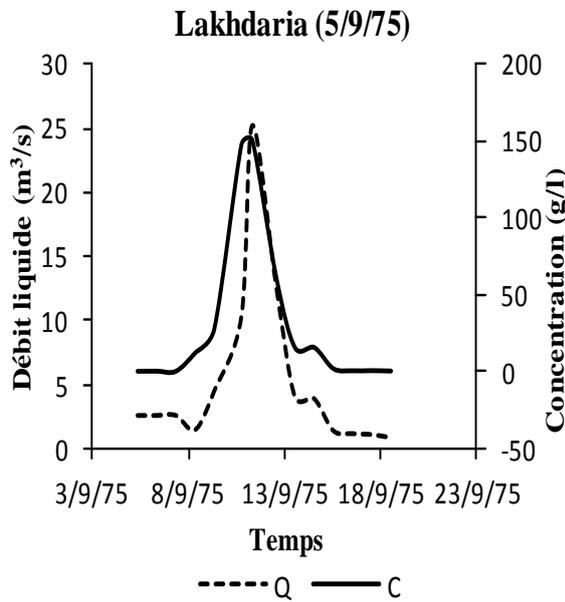
2.2.2. Explication par l'énergie :

L'énergie maximale développée par le cours d'eau correspond au débit maximum du débit liquide. Cependant, on remarque que le maximum de la concentration est atteint avant le seuil énergétique maximal. Autrement dit, le rendement maximal dans la production des sédiments n'est pas atteint par l'énergie maximale. L'énergie et la production de cette énergie ne sont pas proportionnelles. Une faible énergie au début de l'événement est responsable d'un maximum de transport de sédiment alors que le maximum d'énergie en produit moins.

A seuil énergétique égale $Q_i=Q_j$, la mobilisation des sédiments n'est pas la même. Une même énergie mobilise plus de sédiment durant le début de la montée des eaux que pendant la descente des eaux, exprimé par l'inégalité $(C_i/Q_i) > (C_j/Q_i)$ (Fig. 2.8-b).

De ce fait, on conclut la présence d'une source de matières facilement mobilisables au début de la crue. Cette source est totalement épuisée avant le seuil énergétique maximal à savoir le débit maximal. La mise en suspension de cette source de matière nécessite un seuil énergétique faible. Les événements de Lakhdaria (7/9/75), Khemakhem (1/10/71), El Ancer

(6/2/86) et Remchi (25/10/95) montrent des débits faibles générant de fortes concentrations au début de la crue et de faibles concentrations lors de la décrue (fig. 2.9).



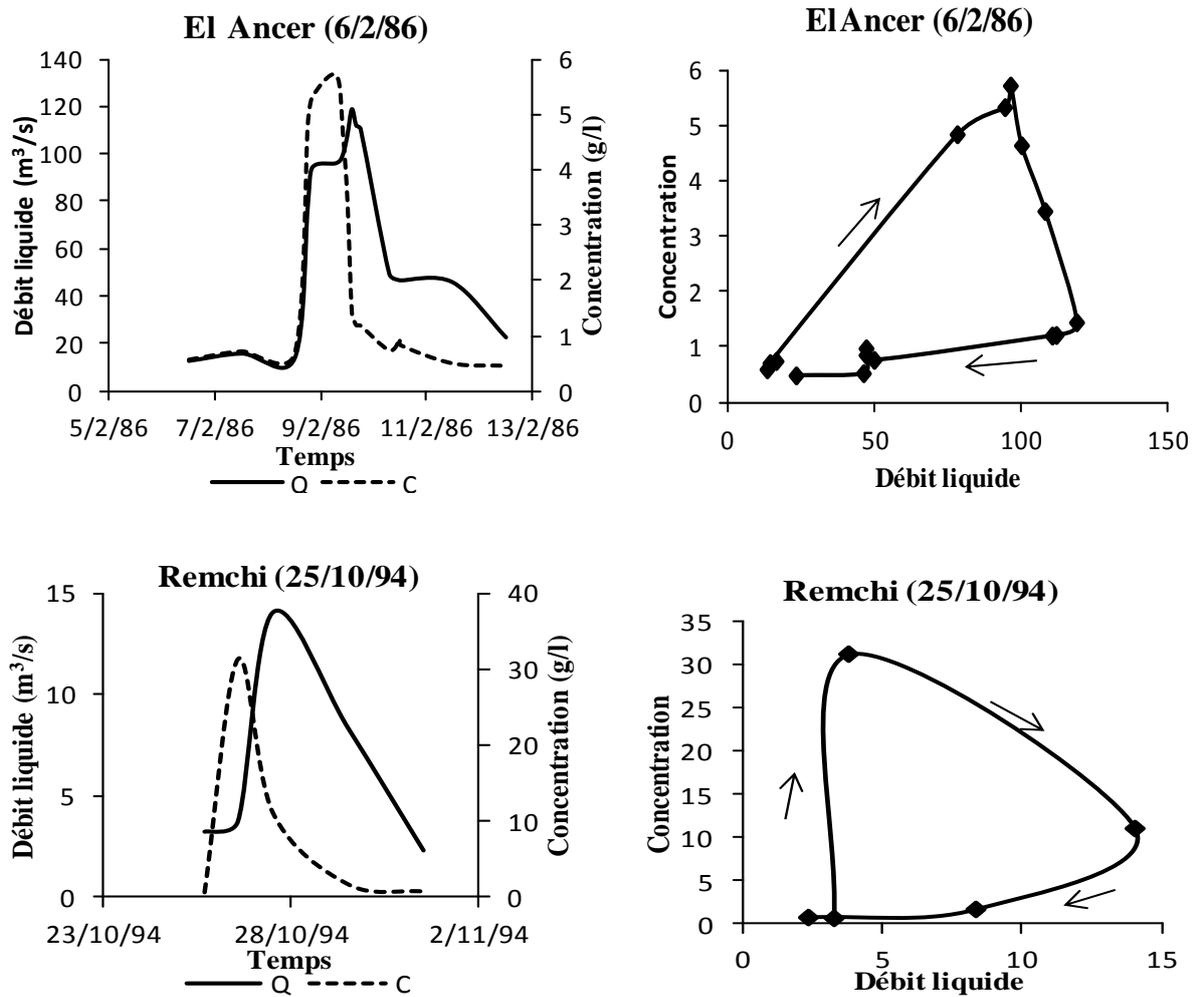


Figure 2.9 : Exemples d'événement de crue générant des hystérésis en forme positive.

2.2.3. Principaux processus responsable de la forme hystérésis positive :

2.2.3.1. Le lessivage en anglais "Wash-load" : la charge solide provenant des versants, concerne principalement les matières organiques et les particules comme l'argile et les limons produits par l'érosion éolienne. L'origine des matières organiques provient essentiellement d'être vivants animal (cadavres) ou végétale (débris et végétaux).

Avant de joindre les écoulements concentrés, ces matières sont généralement transportées par le ruissellement laminaire. Cette composante constitue le lessivage (wash load) et ne nécessite pas une capacité de transport, c'est-à-dire une énergie pour le transport.

Elle peut être très abondante pendant les premières crues automnales survenues après une longue saison d'été chaud, telles que celles qui caractérisent le climat semi-aride méditerranéen où la première crue mobilise une forte charge solide en suspension, comme celles observées à travers les exemples suivants (fig.2.10).

A Lakhdaria l'événement du 1 septembre 1976 montre qu'un débit faible de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ a pu mobiliser une charge importante donnant une concentration de 230 g/l , alors que pour la même crue un débit fort de $61 \text{ m}^3/\text{s}$ a généré une concentration relativement faible de l'ordre de 60 g/l . De même, à El Ancer, la crue du 1 septembre 1981, à un débit faible de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ correspond une concentration de 123 g/l , alors qu'un débit fort de $47 \text{ m}^3/\text{s}$ n'a généré qu'une concentration de 15 g/l .

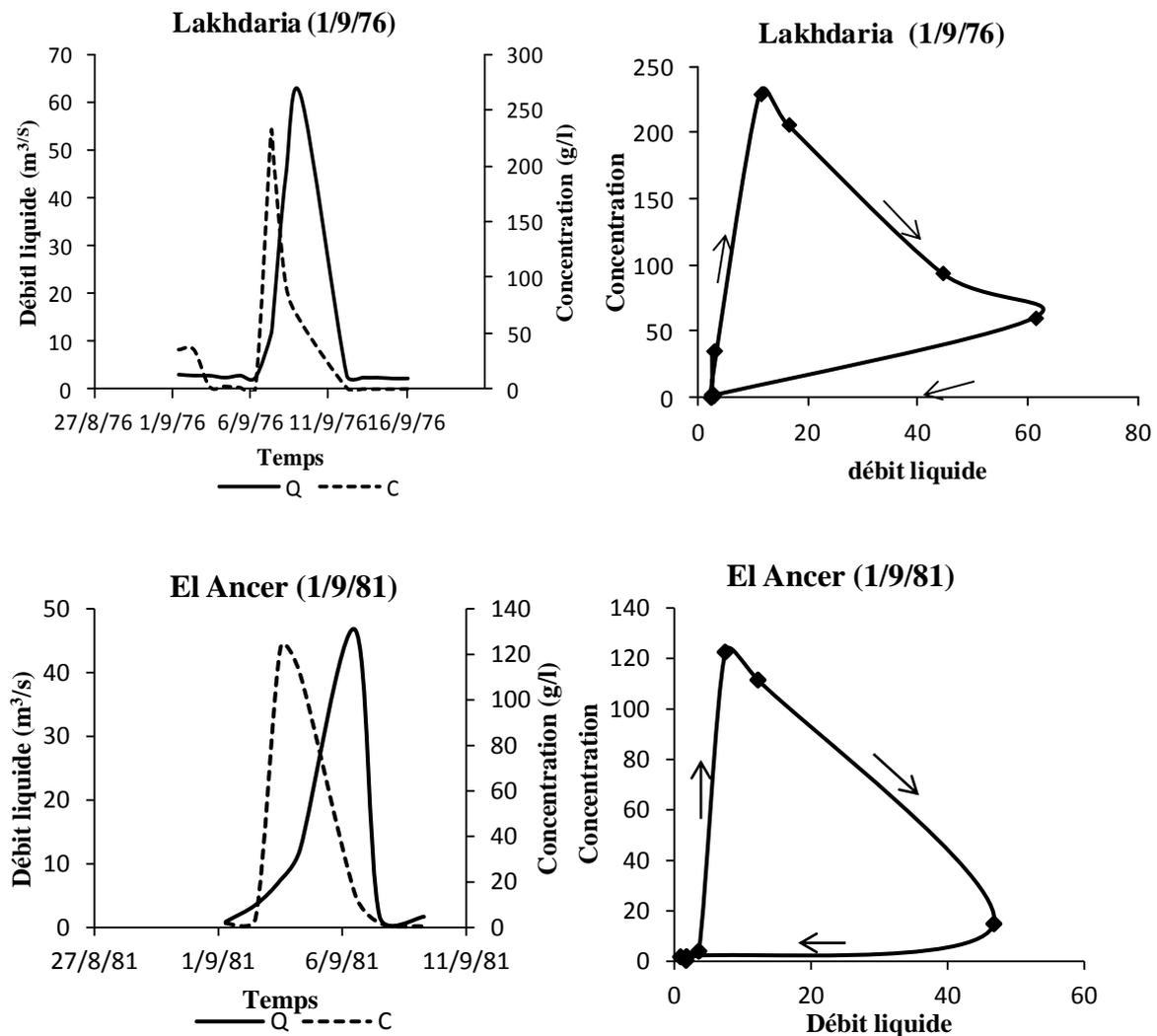


Figure 2.10 : Exemples des hystérésis positives produites par les premières crues automnales.

2.2.3.2. La remise en suspension :

Lors de la décrue, une baisse rapide des contraintes hydrodynamique favorise un piégeage progressif des particules des plus lourdes aux plus fines. La survenue d'une crue avant la consolidation de ces dépôts peut facilement mobiliser ces matières produisant une hystérésis positive. Ainsi, la remise en suspension est souvent observée lorsque le temps séparant deux événements de crue est court. Les crues du 12/4/76 et le 15/4/80 observés à la station Lakhdaria (fig.2.11) montrent bien ce phénomène.

En effet, le premier événement était important en apport en eau et laisse penser que l'énergie développée par l'écoulement, débit de point élevé supérieur à $60 \text{ m}^3/\text{s}$, a évacué l'essentiel de la fourniture sédimentaire facilement mobilisable. Ce pendant, la baisse rapide des contraintes hydrodynamiques, manifestée par une décroissance rapide de la dernière branche de la crue, réconforte cette hypothèse et laisse croire à un piégeage des particules et la formation de dépôts de sédiments. L'arrivée rapide d'un second événement, montre que la hausse du débit a mobilisé les dépôts non consolidés donnant une relation C-Q produisant une hystérésis positive.

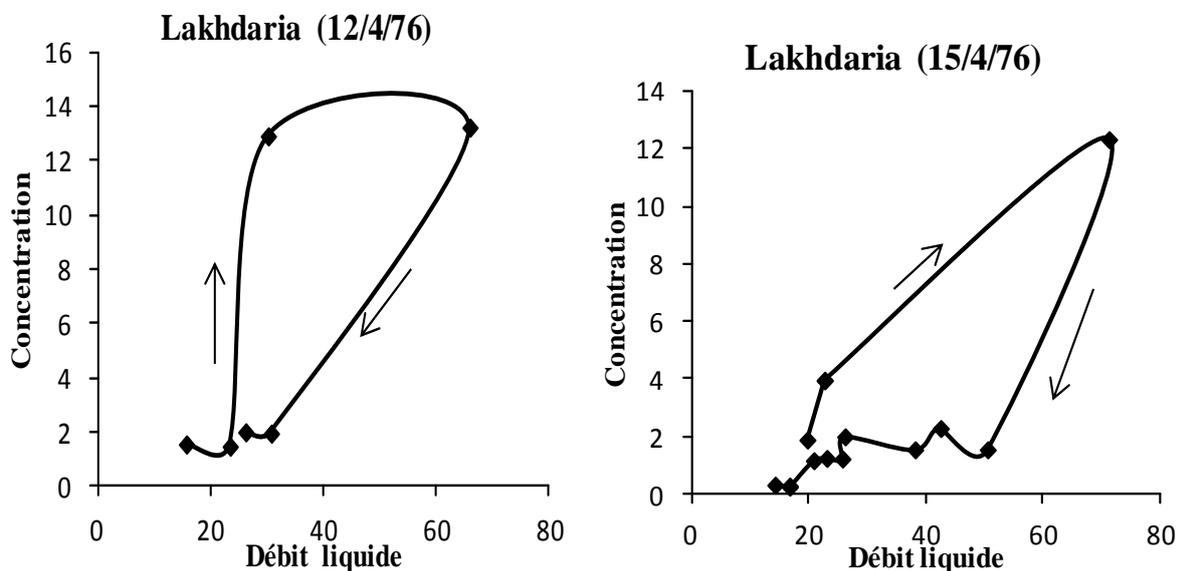
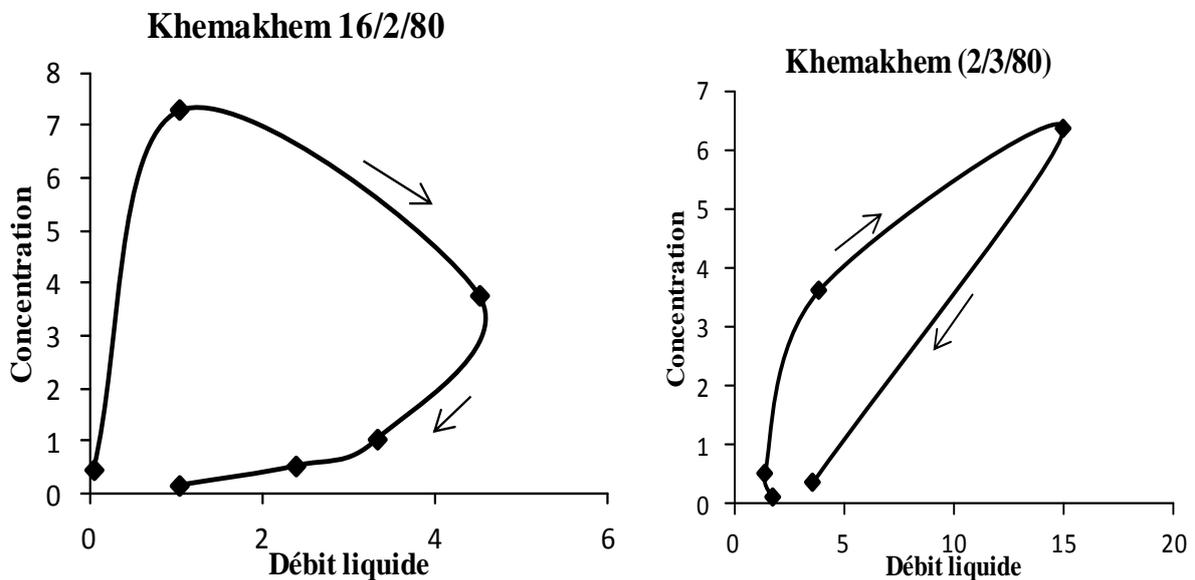


Figure 2.11 : Succession de deux événements de forme positive (1^{er} exemple).

L'exemple suivant (fig.2.12) montre la succession de trois événements observés à Khemakhem le 16/2/80, le 2/3/80 et le 4/3/80. Le premier événement est faible avec un débit de pointe inférieur à 5 m³/s. Il a durée 5 jours. Cet événement a mobilisé une faible charge solide où la concentration maximale est de l'ordre de 7 g/l. Pour cette forme, le lessivage des versants était partiel. Ceci est dû, soit à des averses locales, soit à ce que les précipitations ont intéressé l'ensemble du bassin versant mais elles n'étaient pas intenses pour lessiver l'essentielle de la fourniture sédimentaire produite sur les versants.

Le deuxième événement est survenu 9 jours après. Il présente aussi une forme positive. Les débits relativement forts ont été probablement générés par des pluies plus intenses que celles générant l'événement précédant pour lessiver le complément de la fourniture sédimentaire sur les versants. Avec une décrue rapide, le deuxième événement favorise le dépôt des sédiments. Après un temps court, moins d'une journée, l'arrivée du troisième événement produit une forme positive du essentiellement à la remise en suspension des sédiments fraîchement déposés par le second événement.



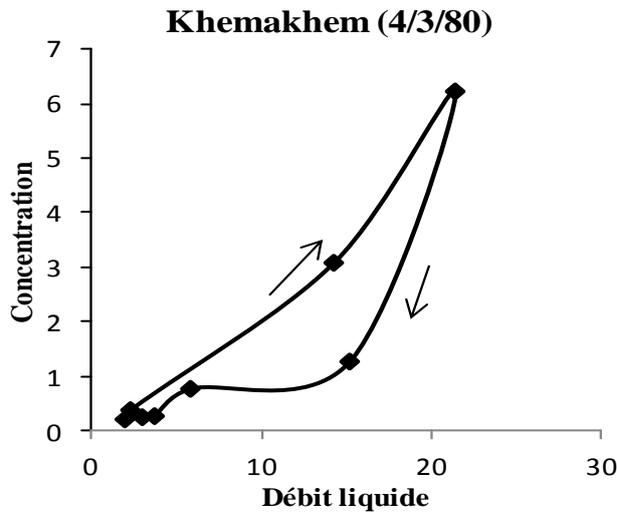


Figure 2.12: Succession de trois événements de forme positive.

L'exemple suivant (fig.2.13) montre la succession de deux événements observés à El Ancer le 23/9/82 et 22/10/82. L'énergie développée par le 1^{er} événement a pu lessiver l'essentiel des matières facilement mobilisables. Cependant, la baisse rapide des débits a favorisé le dépôt des sédiments. Le deuxième événement, bien que faible, a produit une forme positive due à la remise en suspension des sédiments déposés par l'événement précédent.

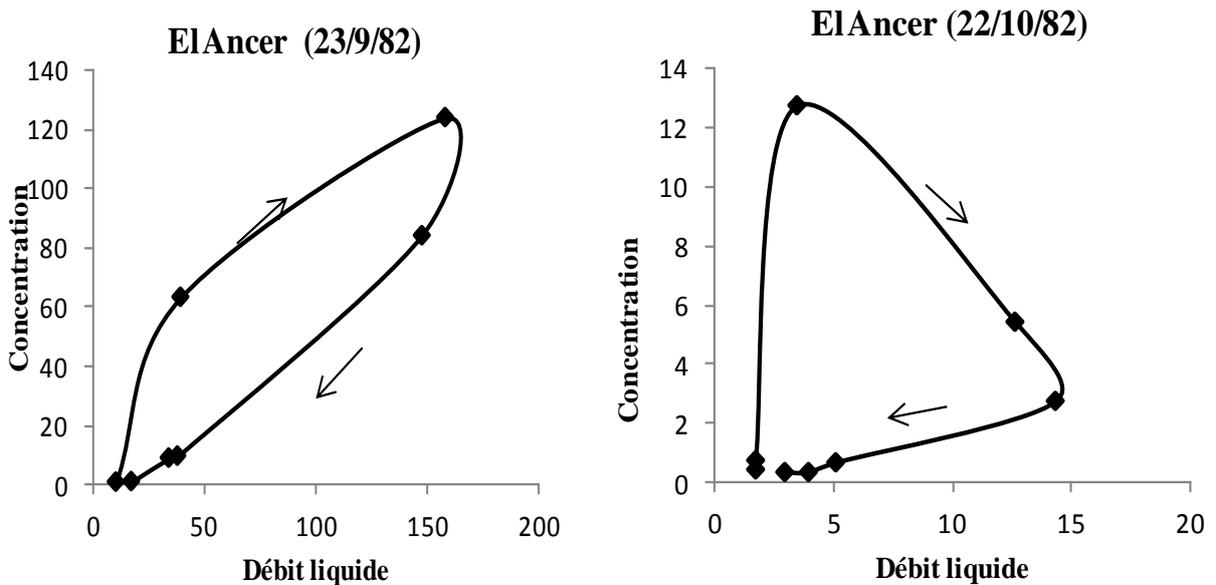


Figure 2.13: Succession de deux événements de forme positive (2^{ème} exemple).

2.2.3.3. La dilution

L'hystérésis positive peut être aussi justifiée par une dilution importante de la concentration par des apports en eau lors de la décrue. La dilution a deux origines possibles, soit par la contribution des écoulements souterrains, soit par une contribution retardée d'un affluent avec des écoulements faiblement chargés. Cependant, sans observation sur le terrain, il est difficile d'identifier de tels événements d'où l'absence de graphes.

2.2.4. Boucle ouverte et boucle fermée :

L'importance de l'ouverture des hystérésis est principalement liée à la fourniture sédimentaire facilement mobilisable, à savoir le lessivage et la remise en suspension. Pour un même débit, plus l'écart $(C_i/Q_i) > (C_j/Q_i)$ est grand et plus la boucle est ouverte. Pour les boucles ouvertes on trouve les exemples de crue suivants (fig.2.14) : Lakhdaria (18/11/76) pour un même débit lors de la montée et la descente des eaux $Q_i=4 \text{ m}^3/\text{s}$ on a des charges différentes $C_i=33 \text{ g/l}$; $C_j=0.46$ donnant des rapports fortement contrastés $C_i/Q_i=8.25 > C_j/Q_i=0.105$. Pour cet événement, l'écart, $\Delta (C/Q)$, atteint des valeurs importantes. Il en est de même pour l'événement du 26/11/80 observé à la station de Khemakhem.

Si pour un même débit, l'écart est faible alors la boucle sera fermée. On cite les exemples des crues observées à Lakhdaria le 21/12/79 ou encore celle d'El Ancer observé le 25/12/80.

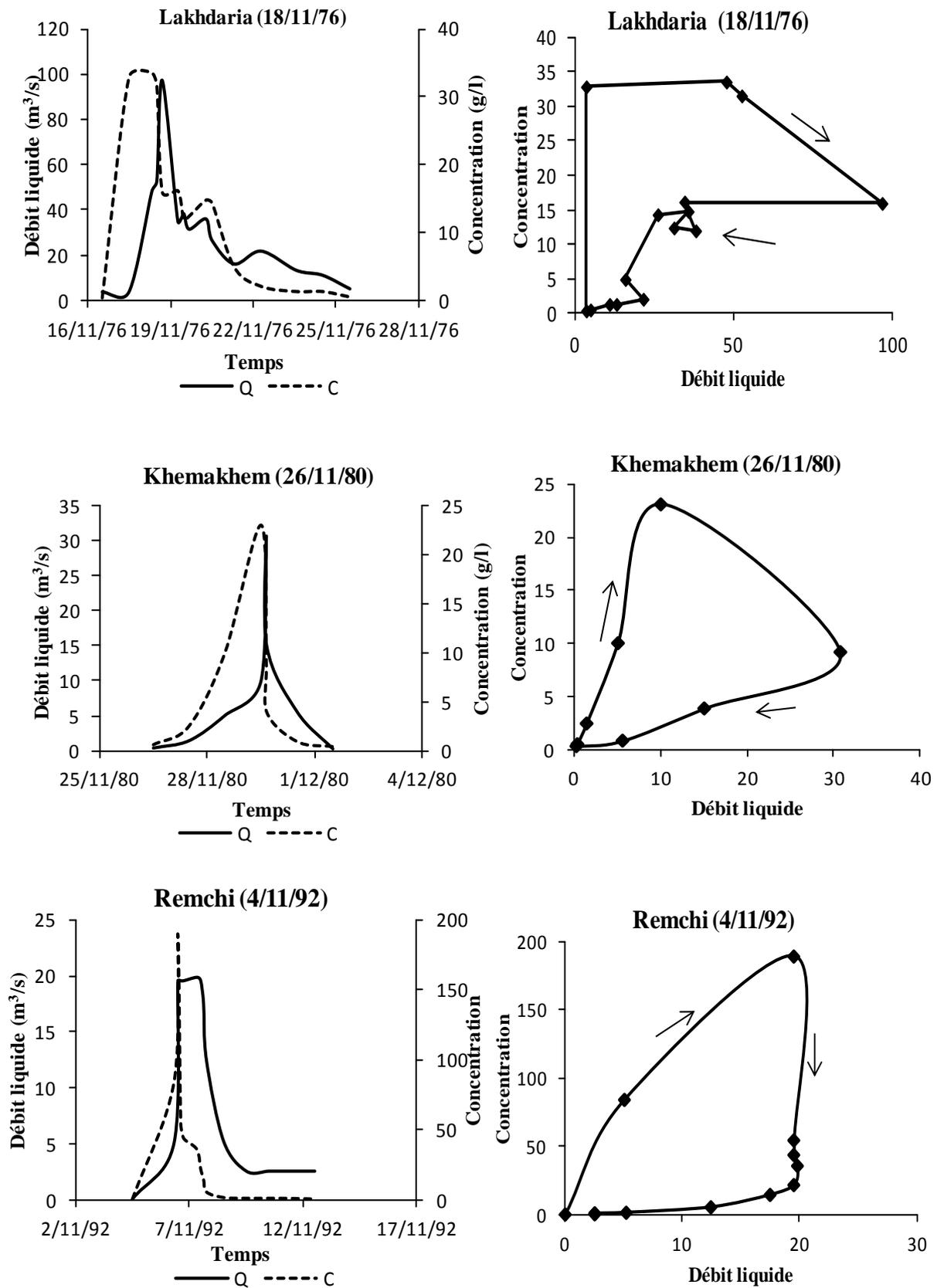


Figure 2.14 : Exemples des hystérésis positives ouvertes.

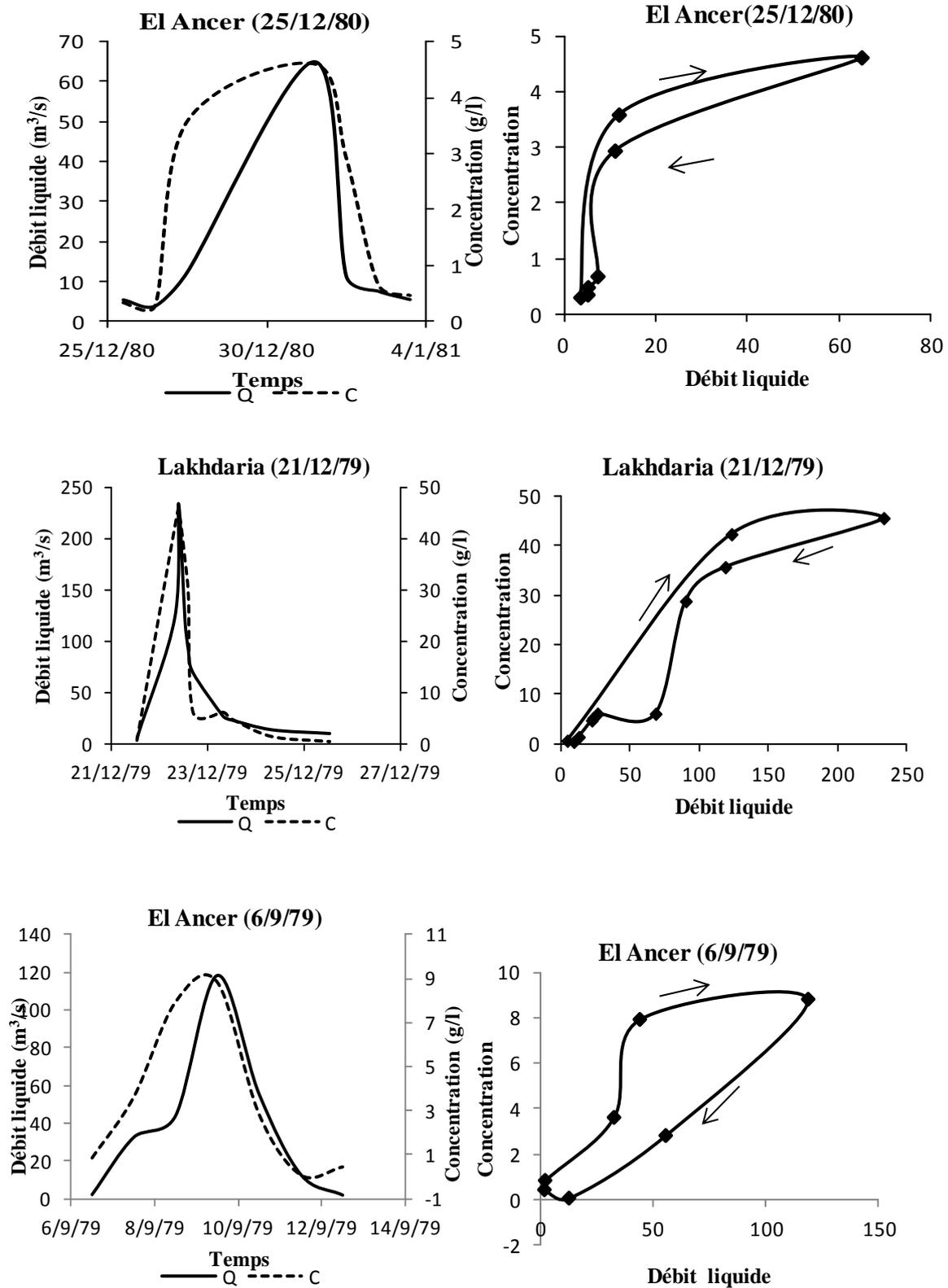


Figure 2.15 : Exemples des hystérésis positives fermées.

L'ouverture de la boucle produite par une hystérésis positive est prononcée lorsque la fourniture des sédiments facilement mobilisables est abondante. De tels événements sont généralement générés par des précipitations ayant intéressées l'ensemble du bassin versant après une longue période sans pluies comme celle observée le 4/11/92 à Remchi (fig.2.14). Durant cette dernière, la concentration a atteint 189 g/l alors que le débit n'a pas dépassé les 20 m³/s. Cette crue a produit 0,15 million de tonnes mobilisée par un apport liquide relativement faible de l'ordre de 6 Hm³.

Dans le cas d'une averse localisée la boucle de l'hystérésis est fermée. L'averse lessive une faible surface et donc mobilise une faible quantité de sédiment. Exemple la première crue de l'année observée à El Ancer le 6/9/79 (fig.2.15) a mobilisé une charge faible donnant une concentration maximale de 9 g/l bien que les débits soient importants atteignant les 119 m³/s. L'apport total transporté durant cette crue est de 0,14 million de tonnes mobilisée par un apport liquide important estimé à 23 Hm³.

2.3. Classe 3 : Négative

2.3.1. Explication par la forme :

La forme négative en anglais "counterclockwise hysteresis" se produit lorsque le pic de la concentration (C_{max}) est atteint après le pic du débit liquide (Q_{max}) (fig.2.16-a). Comme pour la forme positive, ce type d'événement passe par trois phases distinguées marquant l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide (fig.2.16-b) .

Lors de la 1^{ère} phase, le débit liquide (Q) et la concentration (C) augmentent de manière synchrone.

La 2^{ème} phase correspond aux mesures réalisées entre le pic du débit liquide et celui de la concentration. Durant cette phase, la concentration augmente alors que le débit est à la baisse.

Durant la 3^{ème} phase, c'est-à-dire après le pic (C_{max}) le débit et la concentration diminuent de manière synchrone.

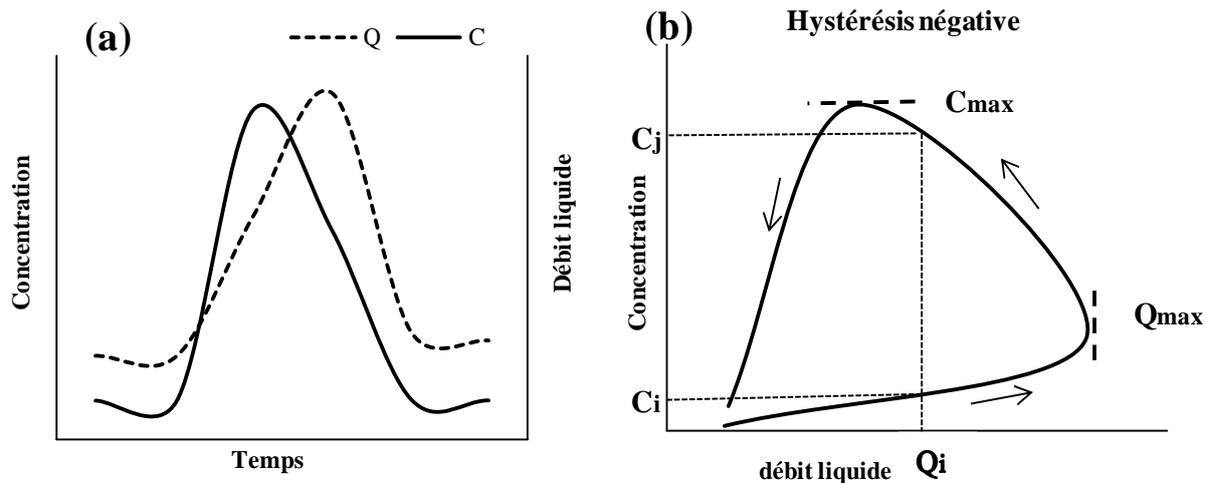
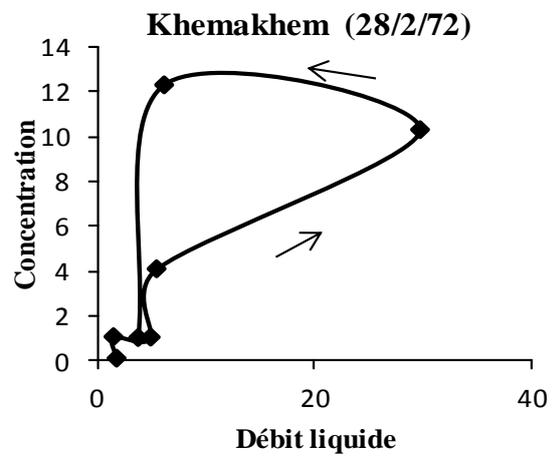
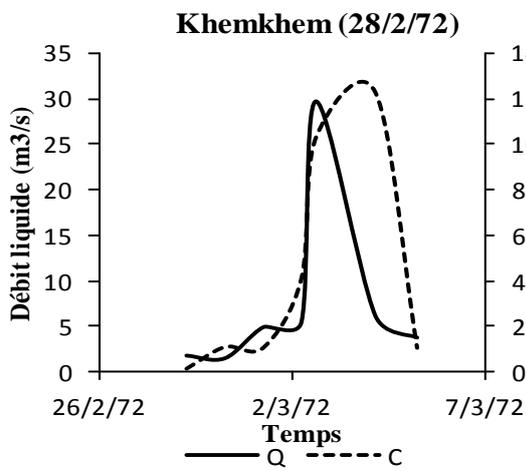
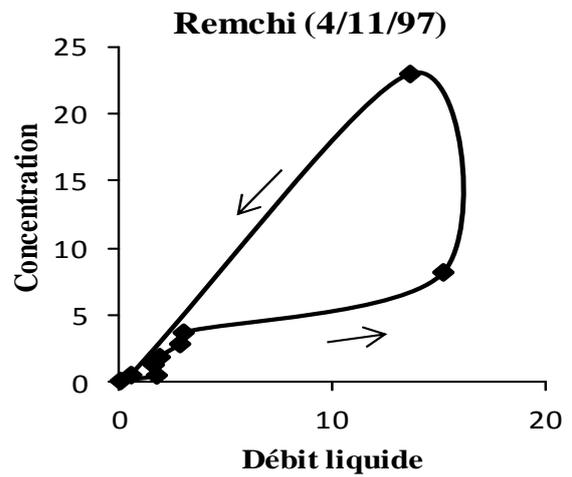
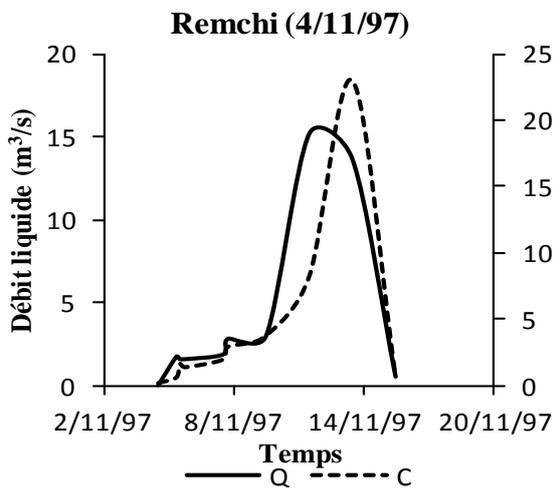
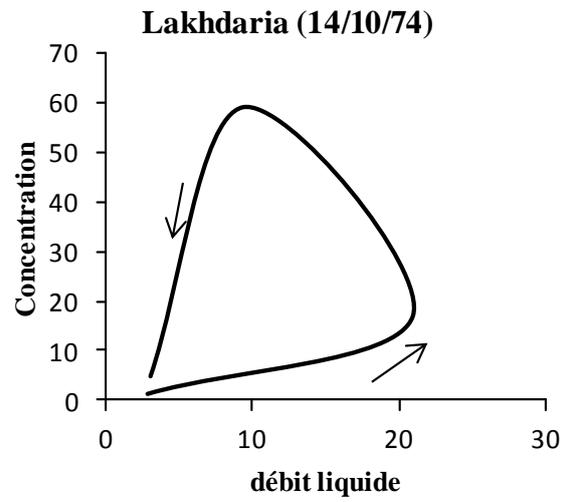
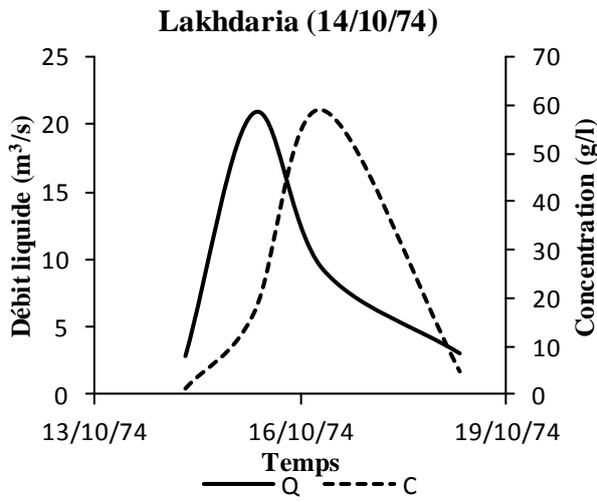


Figure 2.16 : Hystérésis négative (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps ; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide.

2.3.2. Explication par l'énergie :

Le décalage observé entre le maximum de la charge solide produite et le seuil énergétique maximal s'explique par un déphasage entre l'énergie de production qui est l'onde de crue affectant les masses d'eaux et le transfert plus lent des matériaux produits. De ce fait, la concentration durant la montée des eaux est plus faible qu'en descente. A énergie égale $Q_i=Q_j$ mesurée durant la 1^{ère} et la 3^{ème} phase on a $(C_i/Q_i) < (C_j/Q_j)$ (Fig.2.15-b). On déduit alors, une présence de fourniture sédimentaire facilement mobilisable à la fin de la crue nécessitant un seuil énergétique faible pour la remise et le transport en suspension des sédiments.

Pour de tels événements, la production des sédiments et l'énergie nécessaire à cette production ne sont pas proportionnelles. Une faible énergie à la fin de l'événement est responsable d'un maximum de production alors que le maximum d'énergie en produit moins. Les événements de Lakhdaria (14/10/74), Khemakhem (24/2/72), El Ancer (6/2/86) et Remchi (22/03/82) montrent des débits faibles générant de fortes concentrations lors de la décrue alors que durant la montée de la crue les concentrations enregistrées étaient faibles (fig. 2.17).



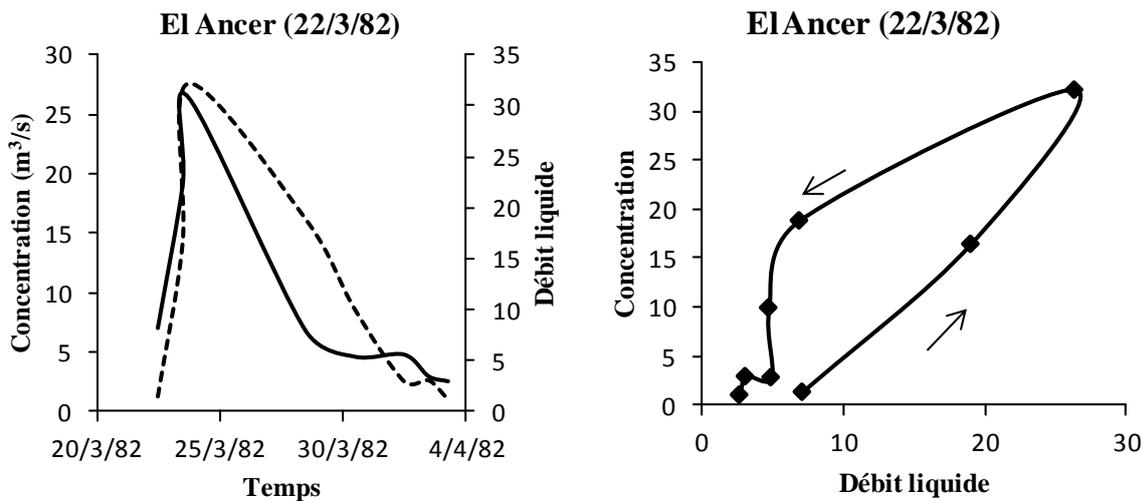


Figure 2.17: Exemples des hystérésis négatives.

2.3.3. Principaux processus responsables de la forme hystérésis négative :

2.3.3.1 Répartition des précipitations :

Lorsque les précipitations intéressent différentes zones du bassin versant avec différentes intensités, il en est de même, la contribution des affluents est différent avec des apports en eaux différemment chargées. De ce fait, l'arrivée des eaux fortement chargées d'une partie lointaine du bassin versant contribue à une augmentation tardive de la concentration des sédiments. En effet et à titre d'exemple, la période qui sépare les événements observés à Remchi le 25/9/97 et à Khemakhem le 28/2/72 (fig. 2.18) de ceux qui les précèdent était suffisamment longue pour une préparation d'une fourniture sédimentaire importante sur les versants (Rovira et al., 2006).

Ainsi, la forte concentration des eaux observées lors de la décrue peut être attribuée à une contribution tardive d'un affluent fortement chargé par rapport aux écoulements observés.

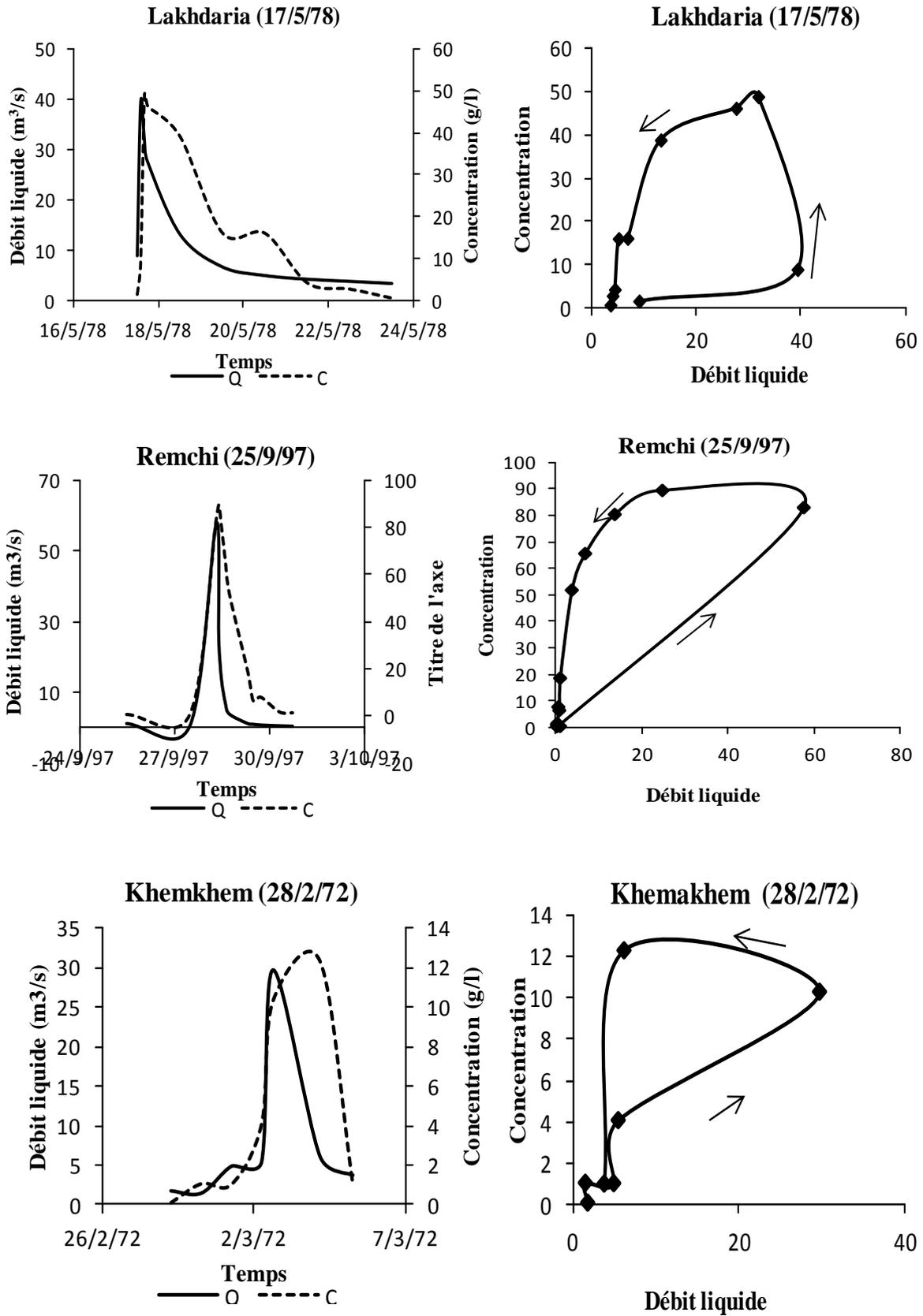


Figure 2.18 : Exemple des hystérésis négatives générées par des affluents tardifs.

2.3.3.2 Erosion local :

2.3.3.2.1. Mouvement en masse : un sol fin sur un substratum imperméable et à forte pente, cas des régions méditerranéennes (Heusch, 1970 ; Roose et al., 1998 et Vanmaercke et al., 2010), se sature rapidement, cède à son propre poids et glisse sur le substratum causant des mouvements de masse. Ce dernier constitue une importante source des sédiments facilement mobilisables.

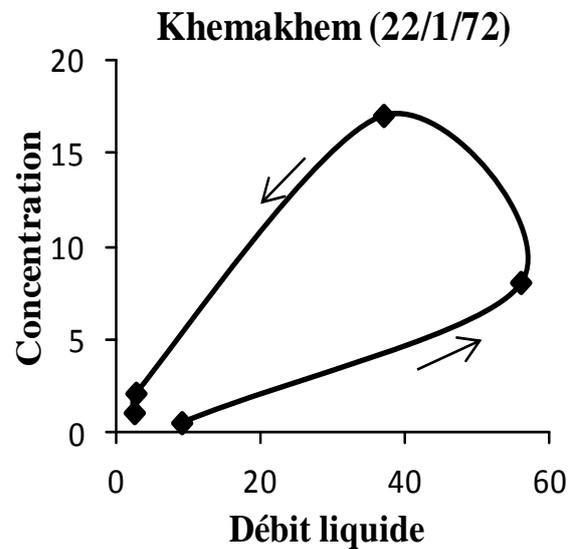
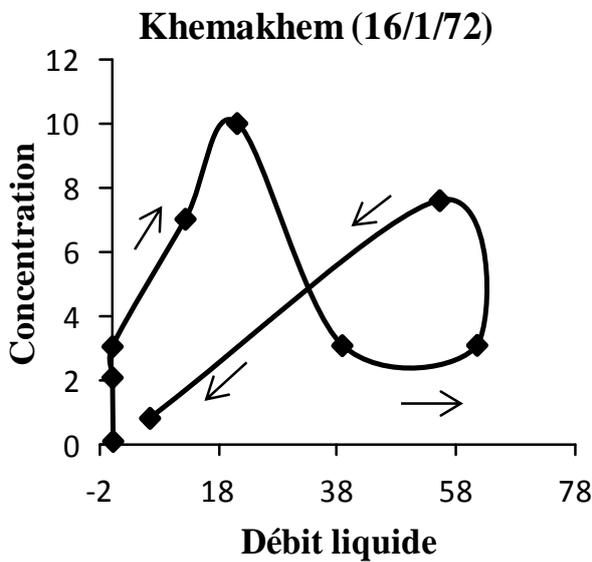
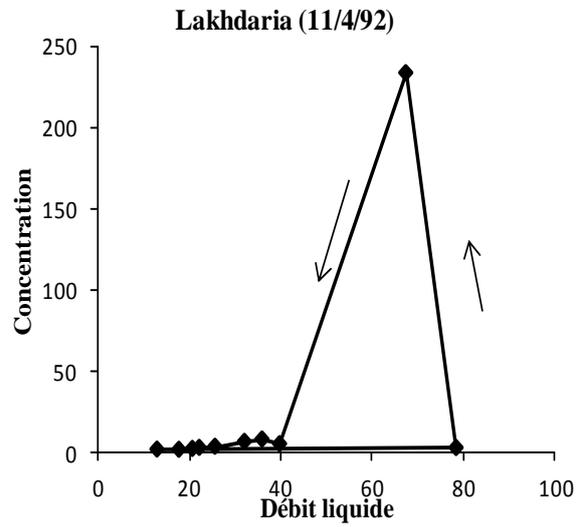
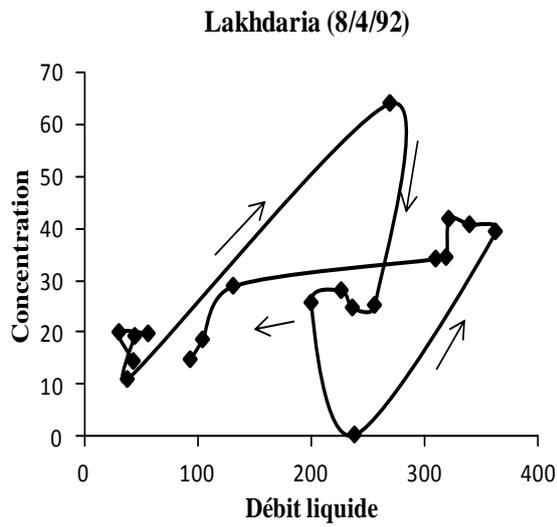
2.3.3.2.2. Effondrement des berges : lors des crues importantes et prolongées la montée des eaux stabilise les berges. Lors de la crue, les berges imbibées d’eaux cèdent à leur propre poids et s’effondrent près du lit mineur, pour fournir une source des sédiments facilement mobilisables. Généralement, les berges sous forme de U sont sujettes à ce phénomène.

2.3.3.2.3. Affouillement : après une crue importante l’arrivée des crues bien que modérée voir faible peuvent causer des affouillements au pied des berges favorisant l’effondrement de ces dernières. Ainsi, Asselman (1999) fait remarquer ce phénomène dans les grands fleuves comme le Rhin et montre qu’un événement modéré qui succède à une grande crue peut provoquer des affouillements dans les berges et crée un décalage entre le pic du débit liquide et celui de la concentration. Hudson (2003) rapporte que ce phénomène peut être important dans les petits bassins versants.

L’érosion locale, générée par l’effondrement et l’affouillement cité précédemment, est souvent observée durant la période humide comme indiqué par Heusch (1971), Hudson (2003), Rovira & Battalla (2006) et Megnounif et al. (2007). En effet, l’analyse des événements de crue enregistrés à travers les 4 bassins d’étude, révèlent que les crues observées vers la fin de la période humide et/ou précédées par des événements importants ont souvent une forme négative. Ces événements sont probablement attribués à des effondrements des berges ou à des mouvements de masse sur les sols minces.

Toutefois, sans l’investigation du terrain, il n’est pas aisé de définir le processus dominant qui génère cette forme d’hystérésis négative que se soit le mouvement de masse, l’effondrement de berges ou l’affouillement.

Exemple des crues à Lakhdaria le 11/4/92, El Ancer le 26/3/79 et Khemakhem le 22/1/72 (fig.2.19). Ces trois événements sont tous précédés par des événements très importants marquant une période humide.



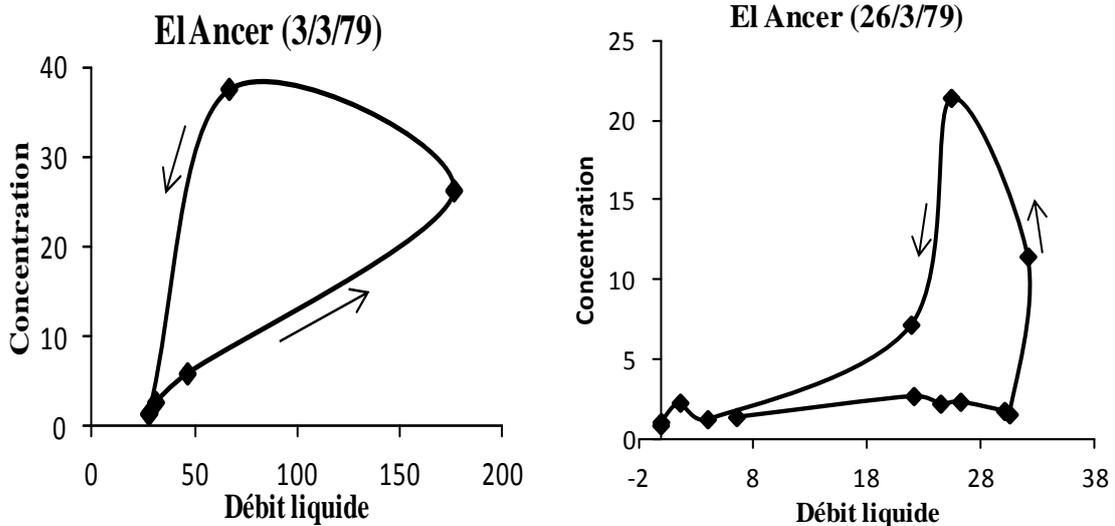


Figure 2.19: Exemples des hystérésis négatives précédés par des événements très importants marquant une période humide.

2.3.4. Boucle ouverte et boucle fermée :

Comme pour les hystérésis positives, l'importance de l'ouverture des hystérésis en forme négative est principalement liée à la fourniture sédimentaire facilement mobilisable (à spécifier une arrivée tardive d'un affluent fortement chargé, les mouvements de masse, les effondrements des berges ou les affouillements). Pour un même débit, plus l'écart $(C_j/Q_i) > (C_i/Q_i)$ est grand et plus la boucle est ouverte.

Pour les boucles ouvertes on cite l'exemple des crues suivantes : Lakhdaria 5/12/72, El Ancer 9/11/83 (fig.2.20) l'écart $(C_j/Q_i) > (C_i/Q_i)$ pour Lakhdaria et El Ancer est très importants.

La réciproque est vraie, si l'écart $(C_j/Q_i) > (C_i/Q_i)$ est faible la boucle sera fermée, on peut citer les exemples suivants observés à : Khemakhem (28/10/83) et Remchi (30/12/97) (fig.2.21) auxquels l'écart $(C_j/Q_i) > (C_i/Q_i)$ est très faible.

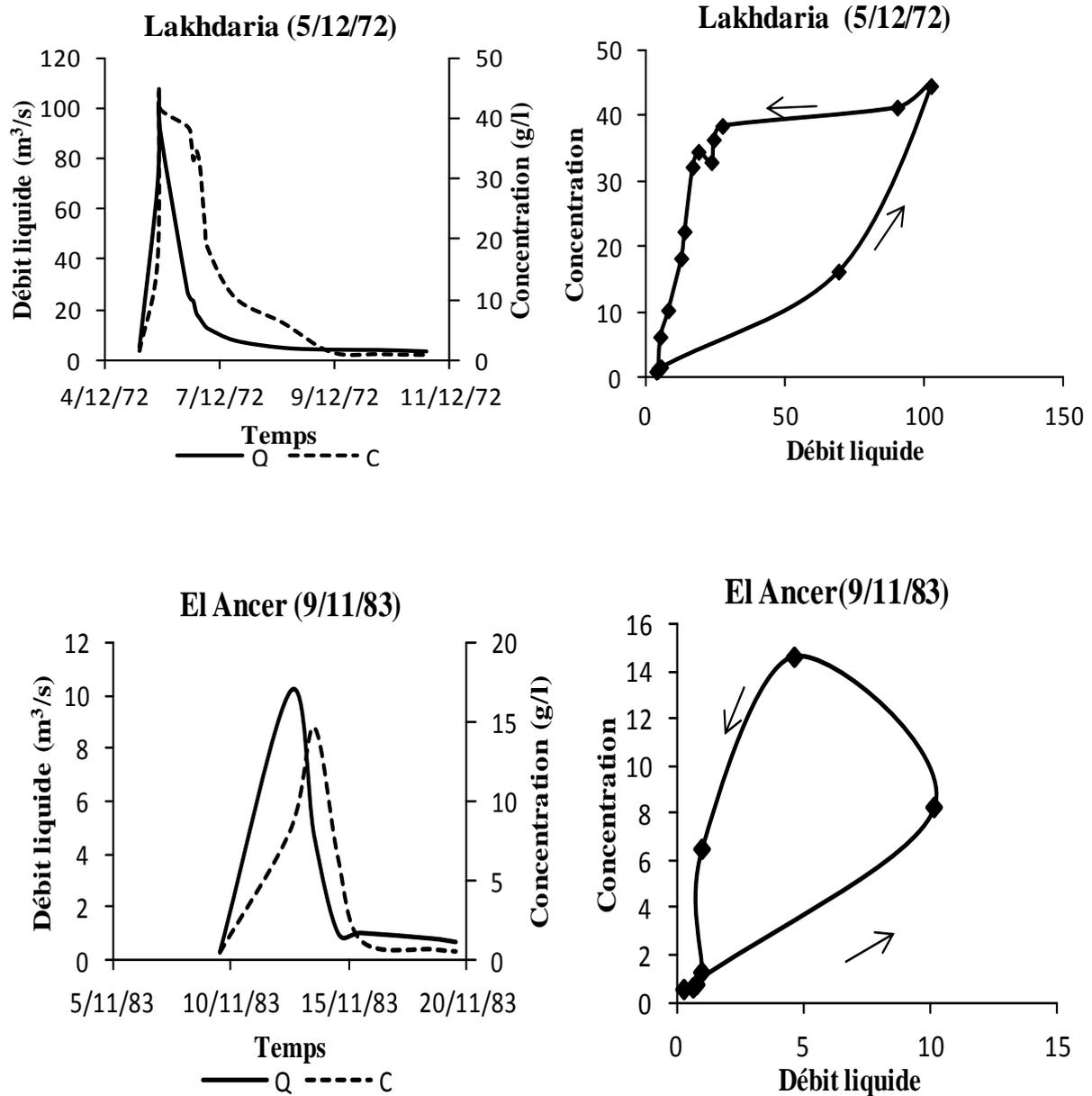


Figure 2.20: Exemples des hystérésis négatives ouvertes.

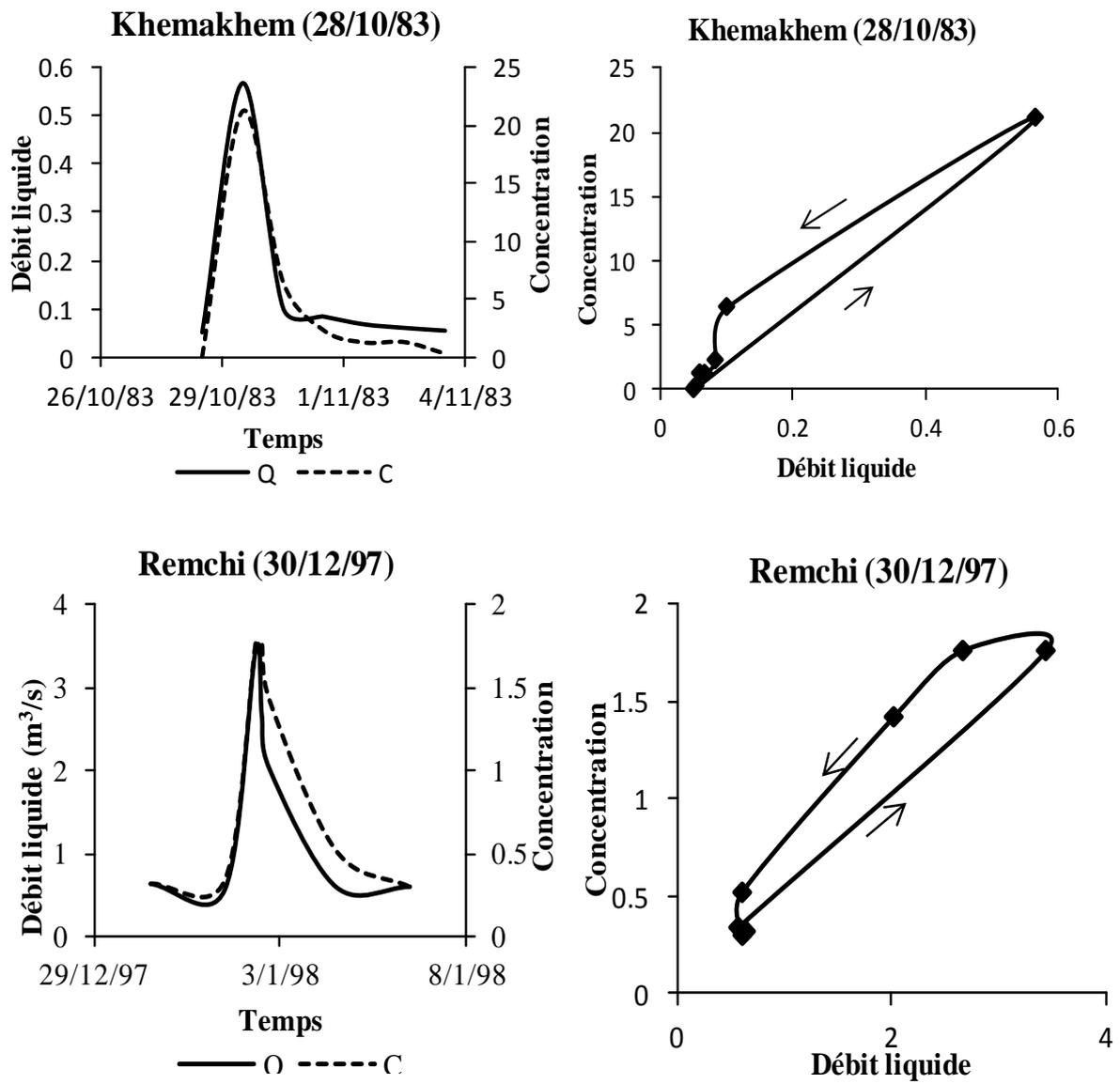


Figure 2.21: Exemples des hystérésis négatives fermées.

A Oued Isser à la station de Remchi l'analyse de la succession de cinq évènements montre l'influence du temps d'arrivé des évènements.

Le premier événement observé le 25/9/97 présente une forme négative. Cet événement, a duré 5 jours. La forme négative s'explique par une contribution tardive d'écoulement chargé mais avec une baisse rapide lors de la décrue.

Le deuxième événement observé le 1/10/97 de forme positive, est dû essentiellement à la remise en suspension. Cet événement produit deux jours après son prédécesseur, bien que faible à généré des écoulements fortement chargés.

Le troisième observé le 5/10/97 présente aussi une forme positive. Le temps court qui sépare cet événement de ces prédécesseurs est très court, principalement le premier événement car important en apport liquide, laisse penser que les matières facilement mobilisables produites sur les versants sont épuisées. En effet, cette source de sédiment est limitée d'une part (Knighton, 1998) nécessite un temps suffisant pour la préparation (Rovira et Batalla 2006). Il est à noter que le second événement est faible, et on pense qu'il n'a pas eu la capacité de transporter les dépôts causés par le premier événement. Mais, la re-suspension s'est effectuée avec la hausse des contraintes hydrodynamiques générée par le troisième évènement (fig. 2.22).

Le quatrième (4/11/79) est de forme négative. Il est précédé par trois évènements, dont deux remarquables avec d'importante contribution en eau. L'augmentation de la charge solide durant la décrue s'explique par l'érosion locale due soit aux mouvements de masse, soit aux effondrements ou affouillements des berges. Une baisse très rapide lors de la décrue peut être remarquée pour cet évènement.

Le dernier événement observé le 19/11/97 a une forme positive du à la remise en suspension des dépôts antérieures.

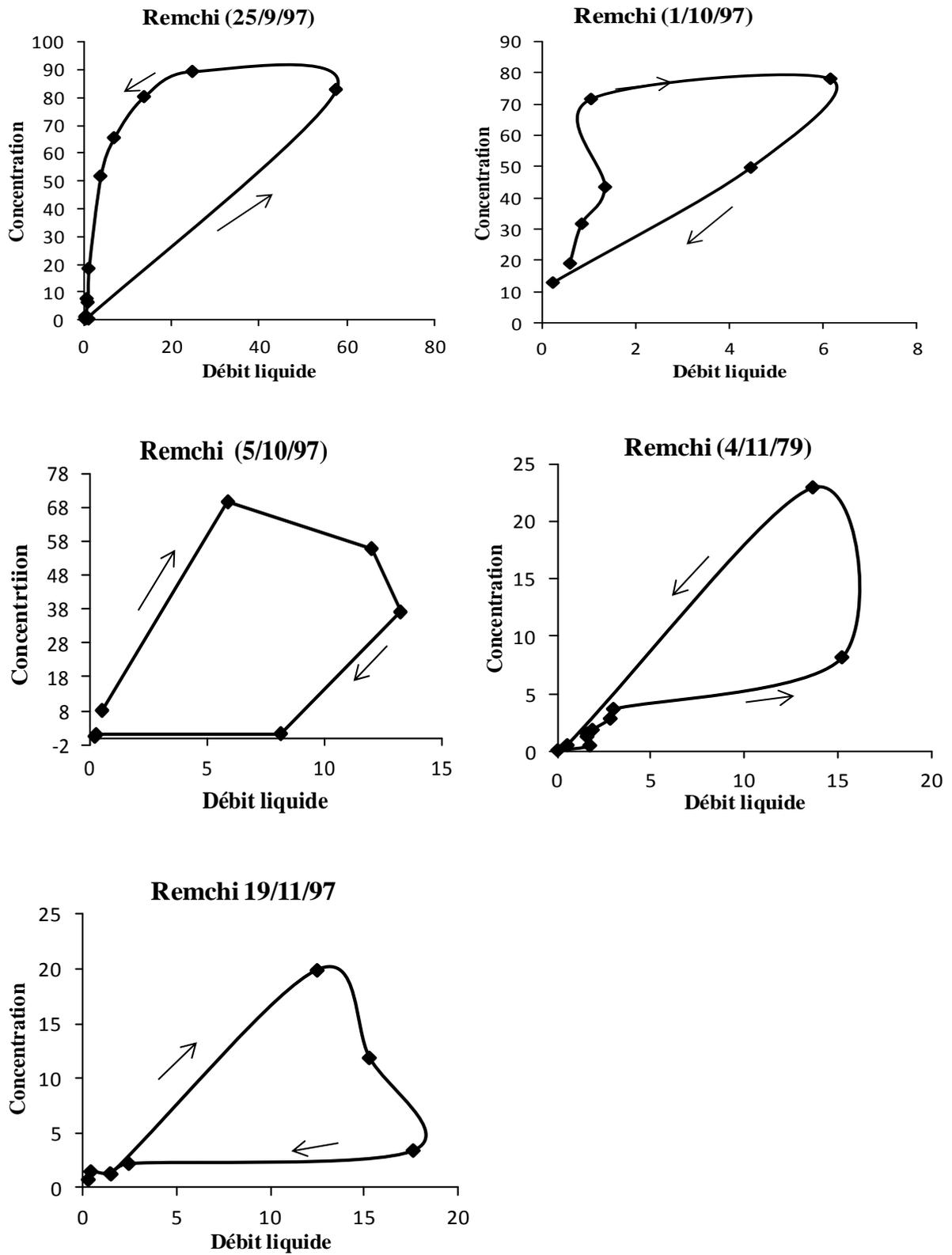


Figure 2.22: influence de la succession des événements sur la production des sédiments

CHAPITRE III
HYSTERESIS DE FORME COMBINEE

3. Chapitre

Hystérésis de forme combinée

3.1. Introduction

En plus de trois formes d'hystérésis simple décrites dans le chapitre précédent (Chapitre 2), on trouve d'autres formes d'hystérésis, dites formes combinées. On distingue la forme en huit, courbe simple plus une boucle et forme complexe. Ces événements combinent entre les formes simples étudiées dans le (chapitre 2) à rappeler : courbe simple, forme positive et forme négative. Ces formes résultent de la conjugaison de deux ou plusieurs processus. Ils sont soit mono-pic soit multi-pics.

3.2. Classe 4 : Forme en huit

3.2.1. Explication de la forme :

Pour un événement de crue produisant une forme en huit, l'évolution du débit en fonction du temps $Q(t)$ est mono-pic, alors que l'évolution de la concentration en fonction du temps présente deux pics. La concentration atteint deux pics, un avant le pic du débit liquide et l'autre après.

Quant à la relation, concentration C en fonction du débit Q , on remarque que la forme en huit est une combinaison entre une hystérésis positive et une hystérésis négative. Ce type d'événement passe par quatre phases.

Lors de la 1^{ière} phase, c'est-à-dire les mesures réalisées avant le premier pic de la concentration, le débit liquide (Q) et la concentration (C) augmentent de manière synchrone.

La 2^{ème} phase correspond aux mesures réalisées entre le pic de la concentration et celui du débit max. Lors de cette phase le débit augmente alors que la concentration est à la baisse.

La 3^{ème} phase correspond aux mesures réalisées entre le pic du débit liquide et celui de deuxième pic de la concentration. Durant cette phase, la concentration augmente alors que le débit est à la baisse.

Durant la 4^{ème} phase, i.e. après le pic (C_{max}) le débit et la concentration diminuent de manière synchrone. (Fig.3.1)

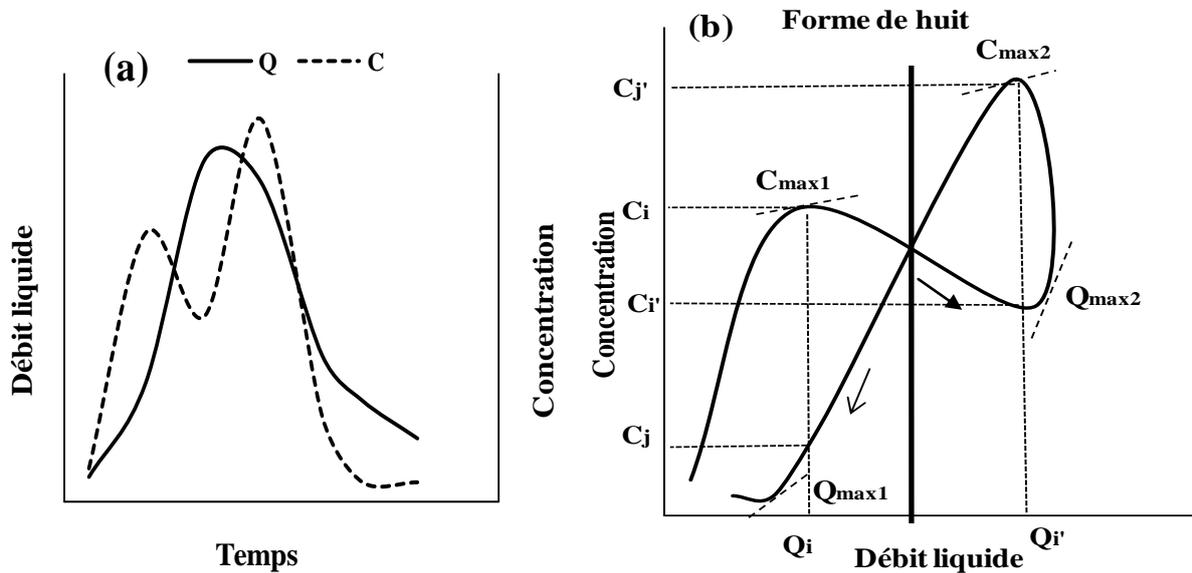


Figure 3.1 : (a) Schématisation de l'évolution du débit liquide et de la concentration en fonction du temps pour une hystérésis en forme en huit ; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction du débit liquide pour une hystérésis en forme de huit.

3.2.2. Explication par l'énergie :

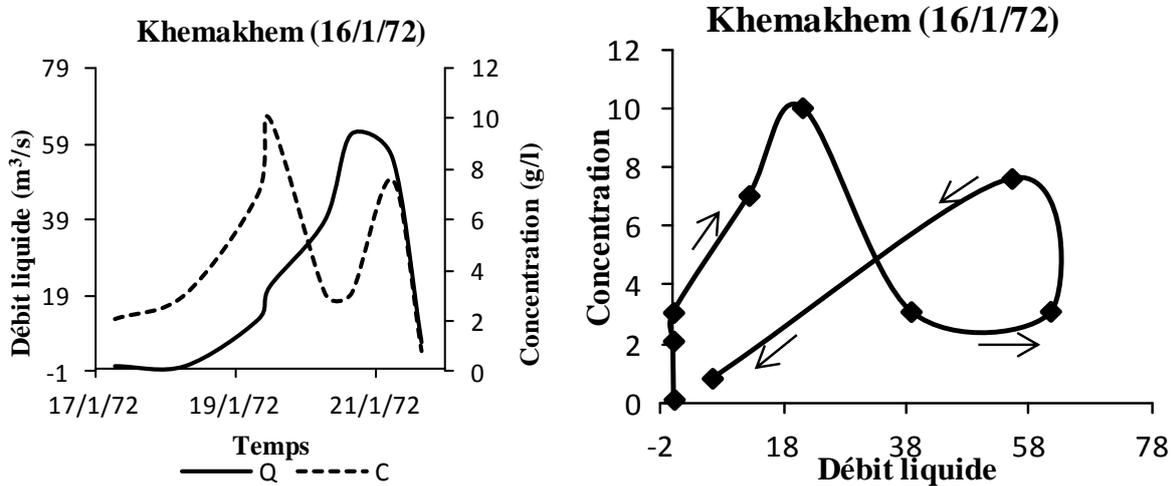
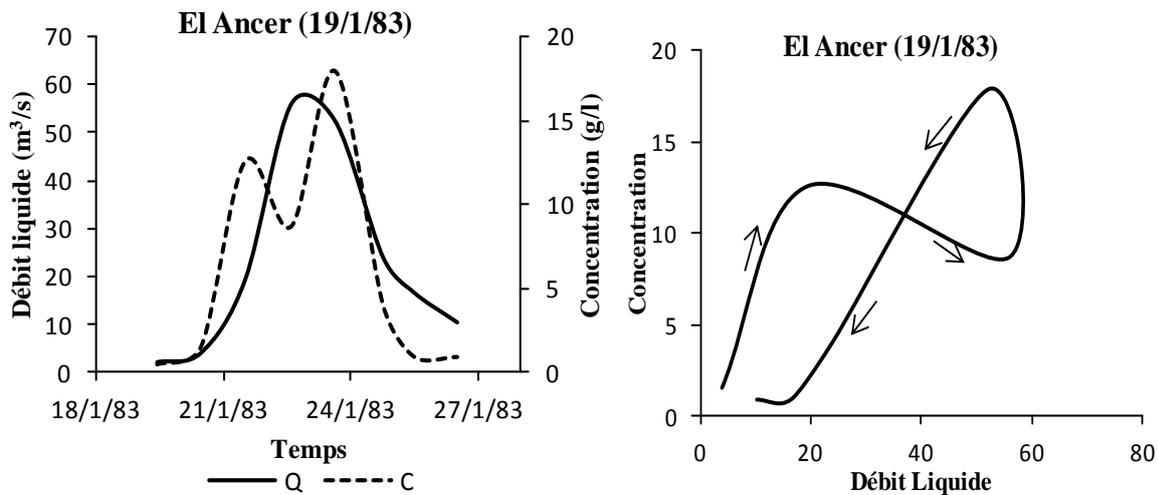
L'hystérésis en forme en huit est une combinaison de deux formes (forme positive et forme négative). L'énergie maximale correspond au débit maximal. Cependant, le flux des sédiments atteint deux pics le premier avant le seuil énergétique maximal et le second après.

Durant un tel événement, la production des MES et l'énergie nécessaire à cette production ne sont pas proportionnelles. Une faible énergie au début de l'événement transporte un flux plus important que celui transporté par le maximum d'énergie c'est-à-dire le débit maximal.

A seuil énergétique égale $Q_i=Q_j$, la mobilisation des sédiments n'est pas la même. Au début et à la fin de la crue, avant le point d'intersection des branches de la relation C-Q, on a $(C_i/Q_i) > (C_j/Q_i)$. Alors que l'inverse $(C_i/Q_i) < (C_j/Q_i)$ est observé à droite trait gras ou bien avant le point d'intersection des branches de la relation C-Q (fig.3.1-b).

On note qu'une présence de fourniture sédimentaire facilement mobilisable au début et à la fin de la crue nécessitant un seuil énergétique faible pour la remise en suspension et le transport.

Quelques exemples de forme en huit produites à travers les stations étudiées El Ancre (19/1/83), (16/1/72), Remchi (14/12/99) et Lakhdaria ((fig. 3.2).



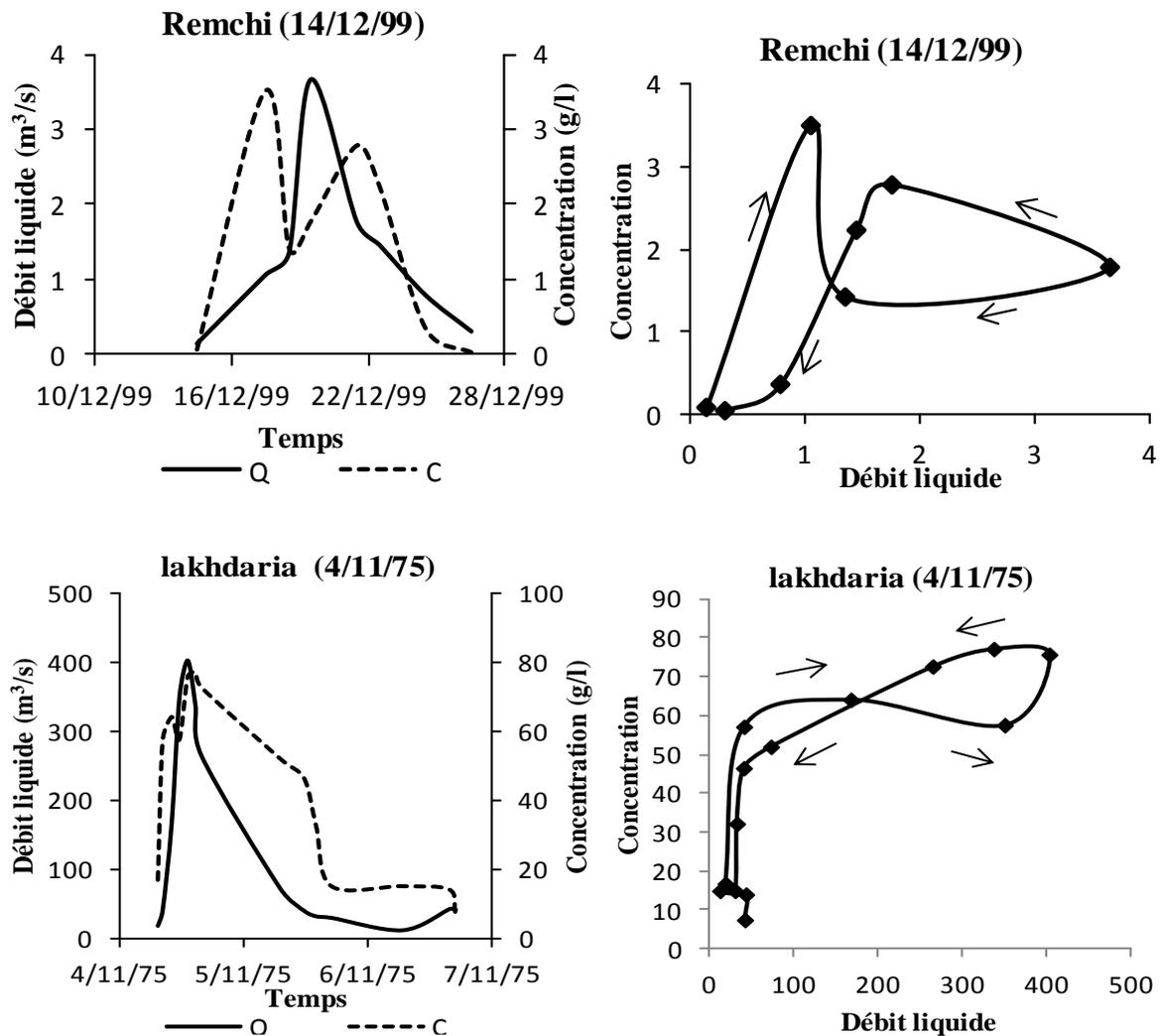


Figure 3.2 : Exemples d'hystérésis en forme de huit.

3.2.3. Principaux processus responsable de l'hystérésis en forme en huit :

Les processus générant les événements produisant les formes d'hystérésis positives et négatives peuvent être combinés pour donner la forme en huit. En effet, l'hystérésis en forme en huit est une combinaison de deux boucles alors de deux processus ou plus.

3.2.3.1. Première boucle

Le début de la crue, soit la première et deuxième phase (fig. 3.1), peut être attribuées à des apports en MES en conséquence au lessivage ou à la remise en suspension.

3.2.3.1.1. Le lessivage en anglais "Wash-Load" concerne principalement les matières produites sur les versants comme la matière organique, les particules fines comme l'argile et les limons produite par l'érosion éolienne. Ces matières une fois détachées du sol, elles deviennent facilement mobilisables. La composante du lessivage (wash load) constitue un stock limité de sédiment. Une fois épuisé, le renouvellement du stock nécessite un temps de préparation. Avant de joindre les écoulements concentrés, ces matières sont généralement transportées par le ruissellement laminaire et ne nécessitent pas une capacité de transport, c'est-à-dire une énergie pour le transport.

3.2.3.1.2. La remise en suspension :

La fraction des sédiments remis en suspension concerne principalement les dépôts frais causés par un événement précédent avec un transport d'une charge solide importante

3.2.3.2. Deuxième boucle

La deuxième boucle correspond à une source additionnelle de sédiments provenant d'une érosion locale (effondrement des berges, affouillement ou mouvement en masse) ou bien par l'arrivée tardive d'un affluent chargé en MES .

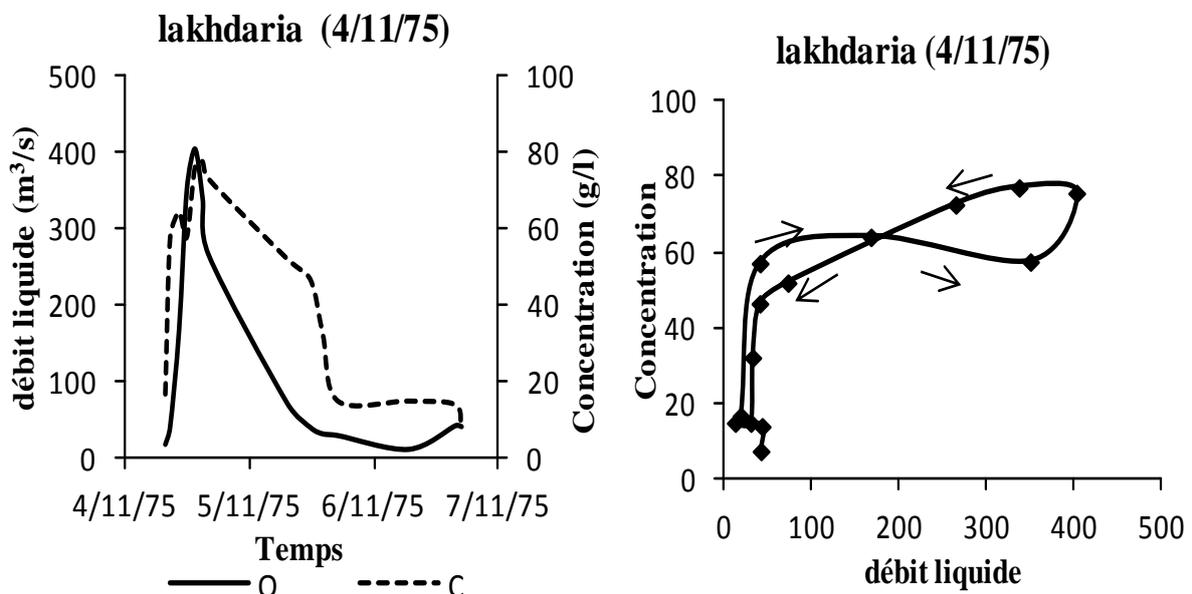
3.2.3.2.1. L'effondrement des berges est observé durant les crues importantes et prolongées. La montée des eaux stabilise les berges. Après la baisse des eaux, les berges imbibées d'eau cèdent à leurs propre poids et s'effondrent pour fournir une source de sédiment facilement mobilisable (près de lit mineur). Ce phénomène est fréquent lorsque les berges sont en forme de U.

3.2.3.2.2. Affouillement arrive souvent après une crue importante. En effet, l'arrivée d'une crue bien que modérée, voir faible, cause parfois et par endroit, des affouillements au pied des berges favorisant l'effondrement de ces dernières.

3.2.3.2.3. Mouvement en masse est produit sur les versants en pente ayant un sol fin sur un substratum imperméable. Le sol se sature rapidement et glisse sur le substratum. Ce phénomène est répondu dans les bassins versants méditerranéens (Heusch et Millies-Lacroix 1971 ; Roose 1991 ; Vanmaercke et al. 2010).

3.2.3.2.4. Arrivée tardive d'un affluent chargé en sédiment : Lorsque les précipitations intéressent différentes zones du bassin versant avec différentes intensités, il en est de même, la contribution des affluents est différent avec des apports en eaux différemment chargées. De ce fait, l'arrivée des eaux fortement chargées d'une partie lointaine du bassin versant contribue à une augmentation tardive de la concentration des sédiments.

La plupart des hystérésis en forme en huit montrent une boucle en forme positive au début de la crue et finissent par une boucle en forme négative. Dans la (fig. 3.3) on montre quelques exemples observés à Lakhdaria (4/11/75), El Ancer (3/2/79), Khemakhem (17/4/72) et Remchi (31/3/92).



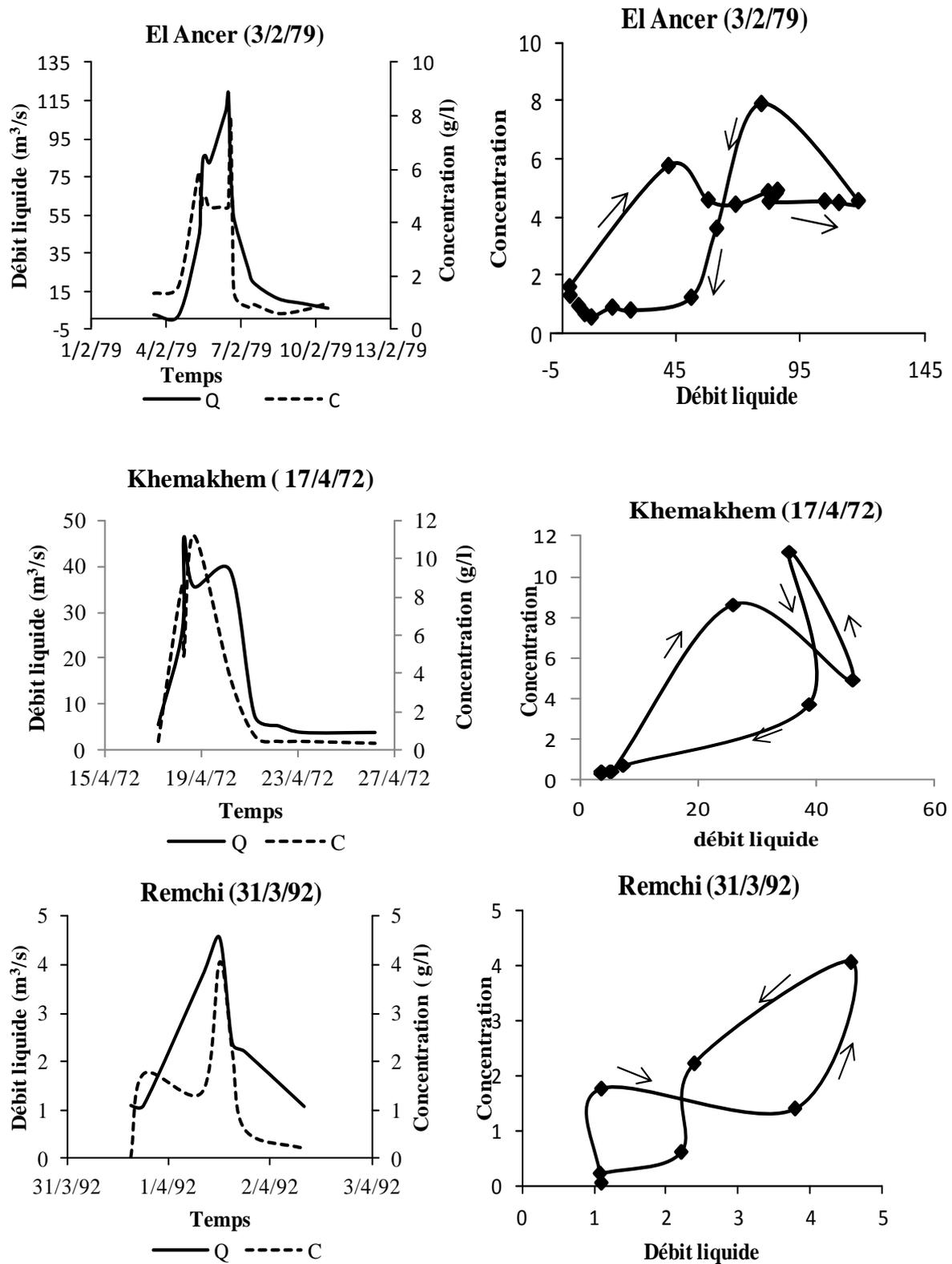


Figure 3.3: Exemples d'hystérésis en forme en huit (boucle positive puis boucle négative).

3.3. Classe 5 : hystérésis en forme de courbe simple plus une boucle:

La relation concentration-débit liquide peut également donnée la forme d'une ligne plus une boucle. Ce genre d'événement combine entre la classe 1 (relation en courbe simple) et la classe 2 (courbe positive) ou la classe 3 (courbe négative). La concentration et le débit liquide sont mono-pic.

3.3.1 Courbe simple plus une boucle positive :

3.3.1.1. Explication par la forme :

Pour cette forme, la décrue correspond à une seule phase, à savoir la phase 4. Par contre, la montée des eaux se manifeste par 3 phases distinctes. La 1^{ère} phase coïncide avec une partie de la 4^{ème} phase. Cette tranche constitue la courbe simple, où le débit et la concentration évoluent de manière synchrone.

La 2^{ème} et 3^{ème} phases constituent les branches d'une boucle positive. Durant la 2^{ème} phase la concentration augmente en fonction du débit de manière plus accélérée que celle observé au début de la 1^{ère} phase.

Durant la 3^{ème} phase la concentration diminue alors que le débit augmente. Durant la 4^{ème} phase le débit et la concentration diminuent de manière synchrone. Cette phase, peut être considérée comme le prolongement de la courbe simple. (fig.3.4)

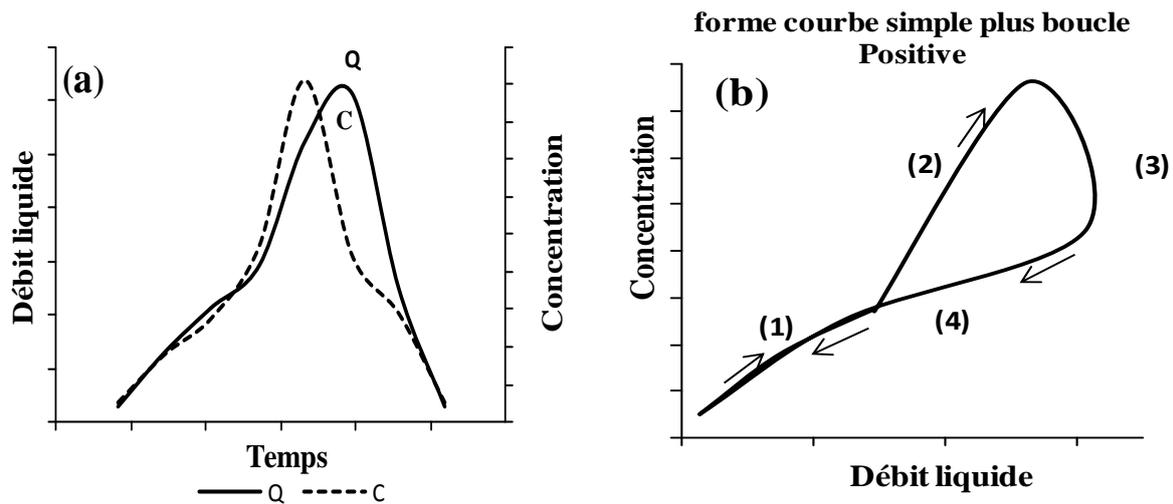


Figure 3.4: (a) Schématisation de l'évolution de débit liquide et de la concentration en fonction du temps pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle positive; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle positive.

3.3.1.2. Explication par l'énergie :

Pour la première partie, c'est-à-dire courbe simple, à énergies égales, la production des sédiments est la même lors de la montée et la descente de l'eau. A seuil énergétique égal mesurés lors de la montée des eaux et la décrue, $Q_i=Q_j$, on a égalité entre les rapports $(C_i/Q_i)=(C_j/Q_i)$.

Pour la deuxième partie, boucle positive, formée par les phases 2, 3 et le début de la 4^{ème} phase, le maximum de concentration est atteint avant le seuil énergétique maximal. A énergie égale $Q_i=Q_j$ mesuré, la mobilisation des sédiments n'est pas la même $(C_i/Q_i) > C_i/Q_i$. (Pour une hystérésis positive)

3.3.1.3 Principaux processus responsable de la forme d'hystérésis en courbe simple plus boucle positive :

Durant les phases correspondantes à la courbe simple le transport des sédiments est étroitement lié aux débits liquides. Les sédiments sont principalement produits dans le réseau de drainage. Cela pourrait être par absence de matières facilement mobilisables.

Par contre la deuxième partie boucle positive, revient à la mise en disponibilité d'une fourniture sédimentaire additionnelle provoquée par une arrivée tardive d'un affluent chargé en sédiments. La forme positive, peut être aussi attribuée à la déstabilisation d'une armature ou pavage protégeant le lit du cours d'eau.

3.3.2. Courbe simple plus une boucle négative :

3.3.2.1. Explication par la forme :

Pour cette forme, la 1^{ère} phase décrit la montée des eaux, alors que la décrue se manifeste par 3 phases distinctes.

La 1^{ère} phase coïncide avec une partie de la 4^{ème} phase. Cette tranche constitue la courbe simple, où le débit et la concentration évoluent de manière synchrone.

La 2^{ème} et 3^{ème} phases constituent les branches d'une boucle négative. Durant la 2^{ème} phase la concentration augmente en fonction du débit de manière plus accélérée que celle observé au début de la 1^{ère} phase. Durant la 3^{ème} phase la concentration augmente alors que le débit diminue.

Durant la 4^{ème} phase le débit et la concentration diminuent de manière synchrone. Cette phase, peut être considérée comme le prolongement de la courbe simple (fig.3.5).

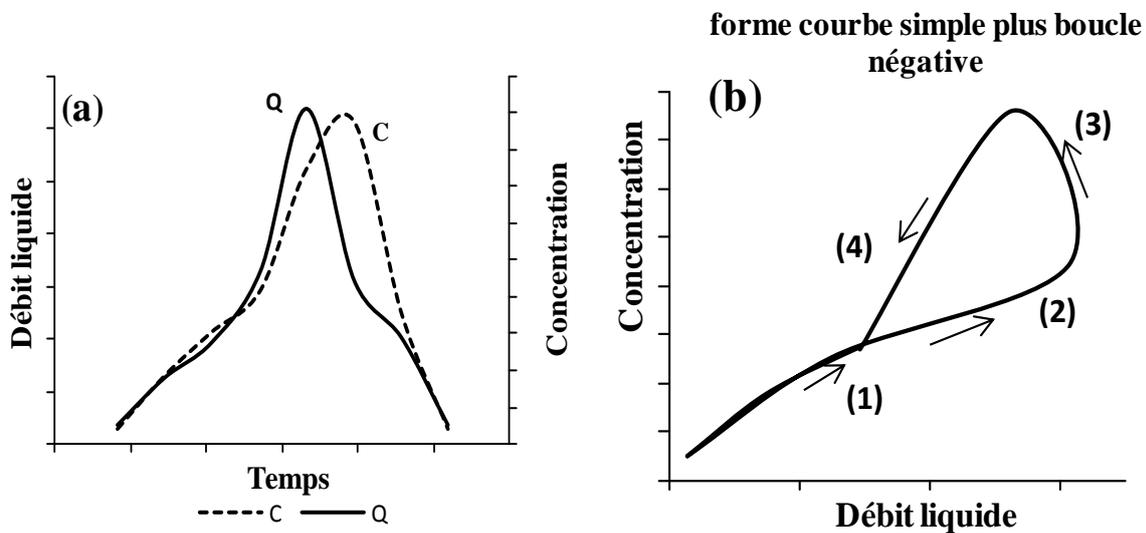


Figure 3.5: (a) Schématisation de l'évolution de débit liquide et de la concentration en fonction du temps pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle négative; (b) Schématisation de l'évolution de la concentration en fonction de débit liquide pour une hystérésis de type courbe simple plus boucle négative.

3.3.2.2. Explication par l'énergie :

Pour la première partie correspondante à la courbe simple, à énergies égales, la production des sédiments est la même lors de la montée et la descente de l'eau. A seuil énergétique égal mesurés lors de la montée des eaux et la décrue, $Q_i=Q_j$, on a égalité entre les rapports $(C_i/Q_i)=(C_j/Q_i)$.

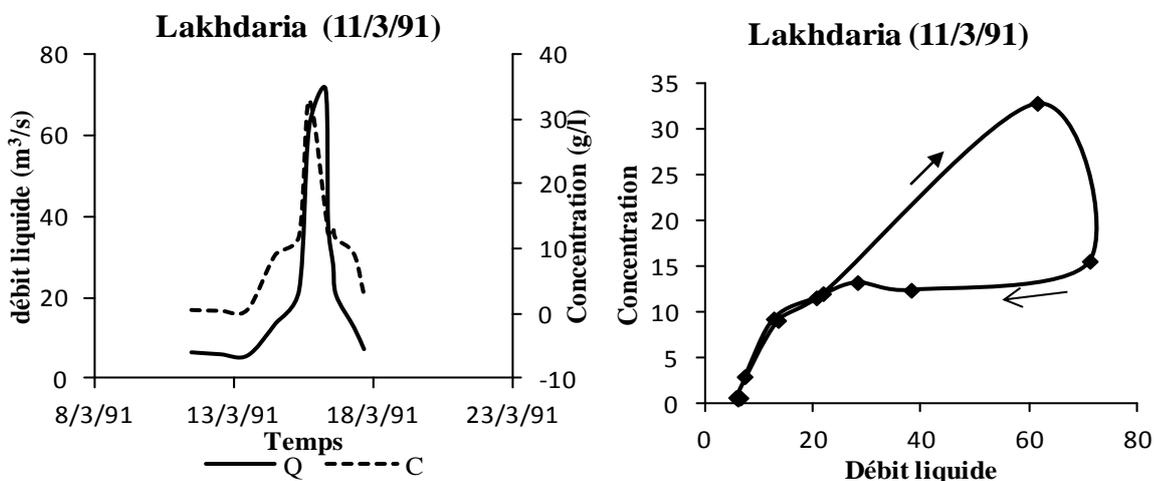
Pour la deuxième partie, boucle négative, formée par les phases 2, 3 et le début de la 4^{ème} phase, le maximum de sédiments est transporté après le seuil énergétique maximal. A énergie égale $Q_i=Q_j$ mesuré, la mobilisation des sédiments n'est pas la même $(C_i/Q_i) < C_j/Q_i$. (Pour une hystérésis négative).

3.3.2.3. Principaux processus responsable de la forme d'hystérésis en courbe simple plus boucle négative:

Durant les phases correspondantes à la courbe simple le transport des sédiments est étroitement lié aux débits liquides éventuellement par absence de matières facilement mobilisables.

Par contre la deuxième partie boucle négative, revient à la disponibilité d'une fourniture sédimentaire additionnelle comme celles décrites pour les événements produisant une forme négative. Cependant, lors de la fin de la décrue est marquée par un épuisement total de la fourniture additionnelle d'où la superposition des branches 1 et 4.

Exemples de quelque hystérésis de forme courbe simple plus boucle : Lakhdaria (11/3/91), (23/2/84) Remchi (28/2/95) (fig.3.6)



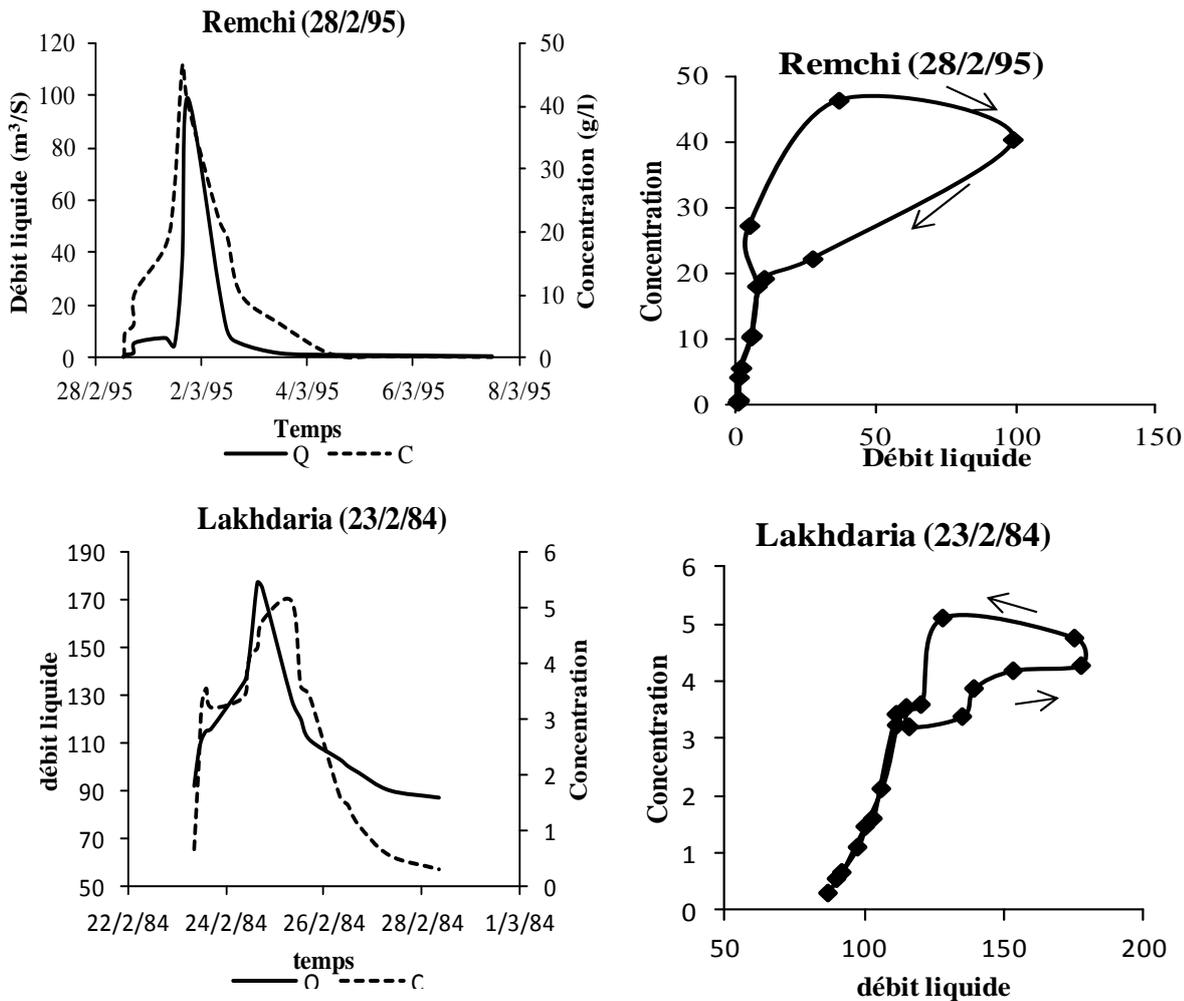


Figure 3.6 : Exemples des hystérésis de type courbe simple plus boucle.

3.4. Relation en forme complexe:

3.4.1. Explication par la forme :

Toute hystérésis combinant trois formes simples ou plus est dite formes complexe. Elle peut combiner entre courbe simple (droite ou courbe) avec deux ou plusieurs boucles positive ou négative ou bien les deux. Comme elle peut être une succession de boucles positives ou négatives.

L'évolution de la concentration (C) et du débit liquide (Q) en fonction du temps montrent plusieurs pics.

3.4.2. Explication par l'énergie :

L'hydrogramme étant multi-pics, confirme une alternance de baisse et hausse d'énergie générant ainsi des dépôts et des remises en suspension. Ceci explique l'apparition de plusieurs boucles généralement non achevées.

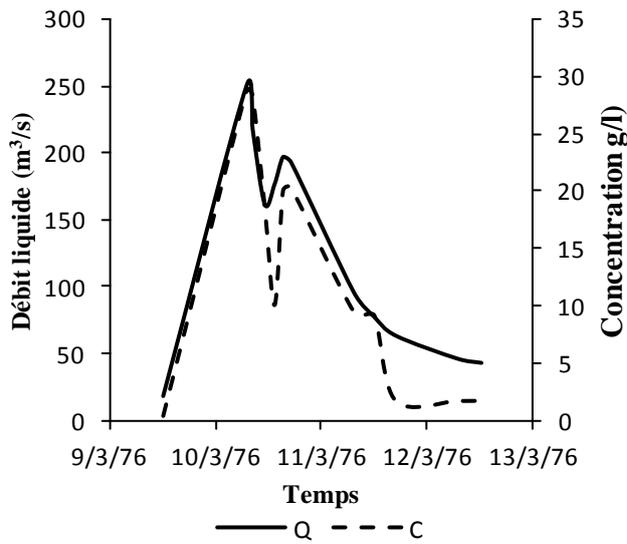
3.4.3. Principaux processus responsable de l'hystérésis en forme complexe :

Si la relation se manifeste par des branches de courbes simples, alors durant celles-ci les sédiments transportés en suspension sont étroitement liés aux débits liquides et proviennent principalement du réseau de drainage. En dehors des branches de courbes simples, tous les processus observés pour les hystérésis positives et négatives peuvent être combinés pour donner la forme complexe.

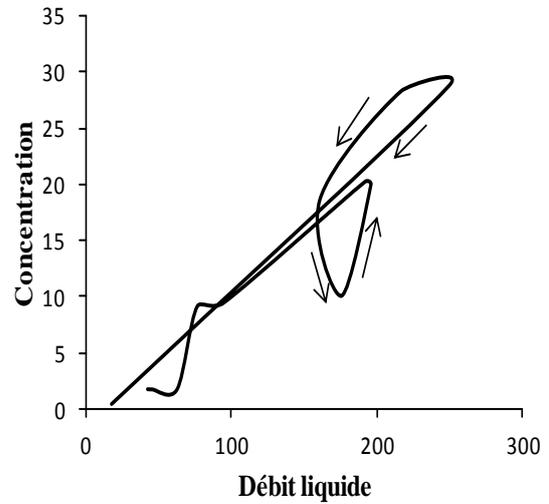
Ces crues sont généralement générées par une succession d'averse de différentes intensités. Les parties correspondantes aux boucles sont générées par l'arrivée tardive d'un affluent chargé ou dilué, ou par alternance de dépôts ou remise en suspension. L'érosion locale, comme les mouvements de masse, l'affouillement et les effondrements des berges sont des processus fréquents lors de ces événements.

Exemples de quelques crues en forme complexe. Il est à noter que ce genre de crue caractérise la période humide hiver et printemps. Comme les crues, 4/2/76, 10/3/76 de la station de Lakhdaria et 2/1/76 de la station de Remchi ou le printemps comme la crue de 20/4/77 et 27/4/83. Durant l'automne, ces événements sont moins fréquents, exemple crue du 27/11/78 observée à Lakhdaria (fig.3.7).

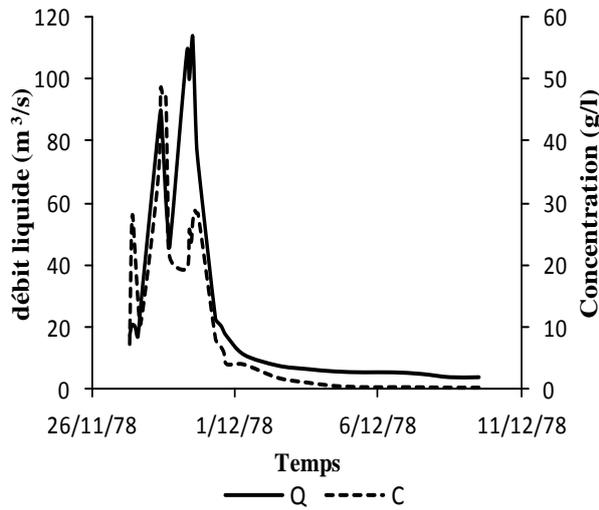
Lakhdaria (10/3/76)



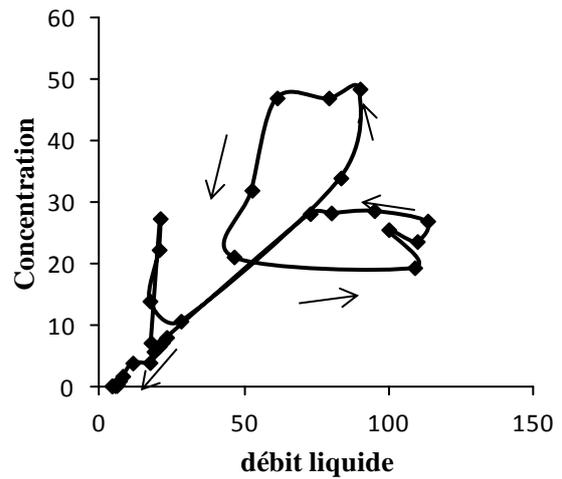
Lakhdaria (10/3/76)



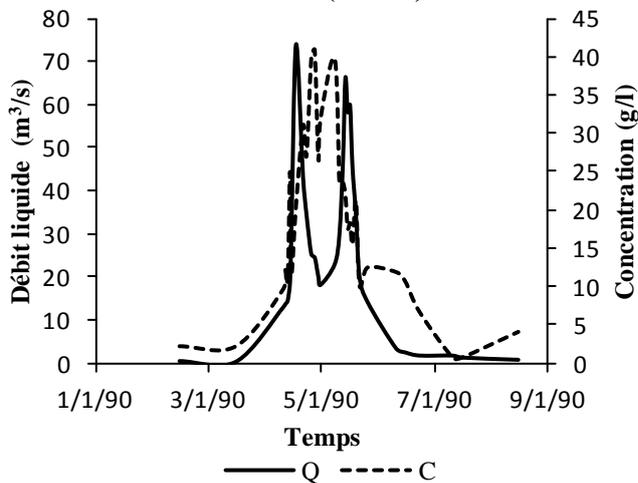
Lakhdaria (27/11/78)



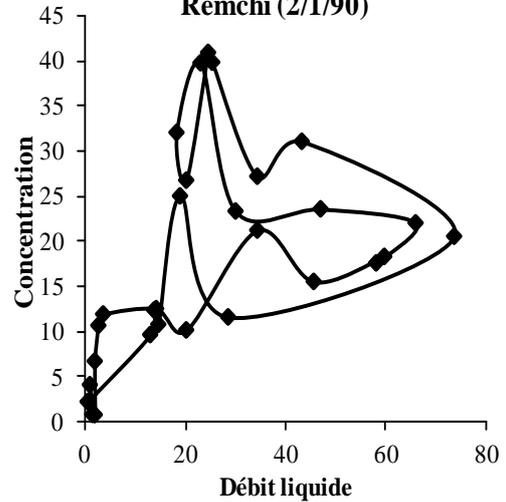
Lakhdaria (27/11/78)



Remchi (2/1/90)



Remchi (2/1/90)



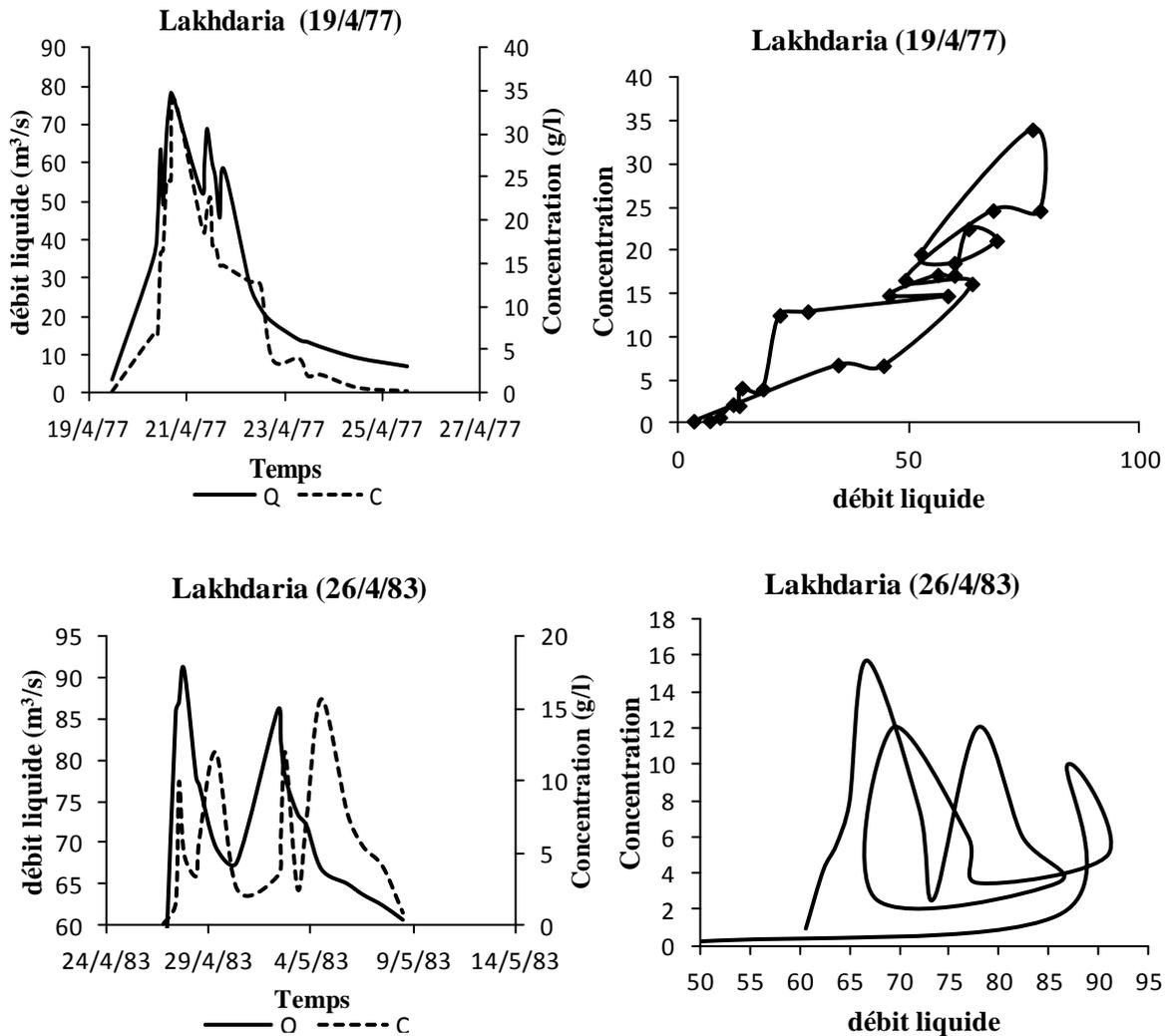
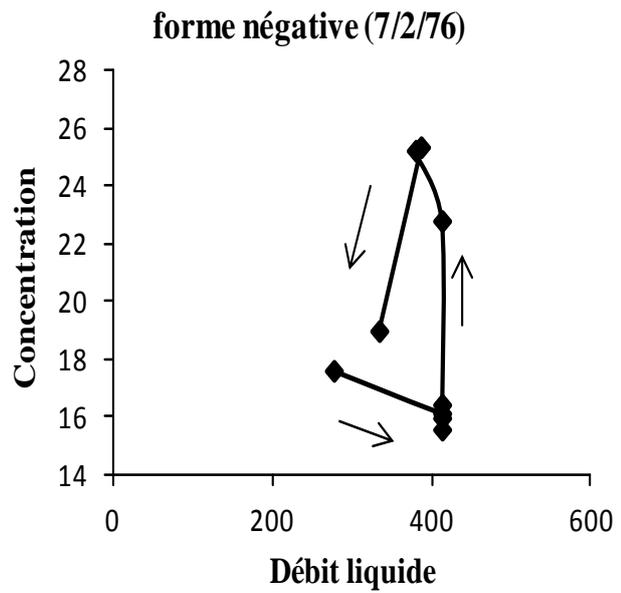
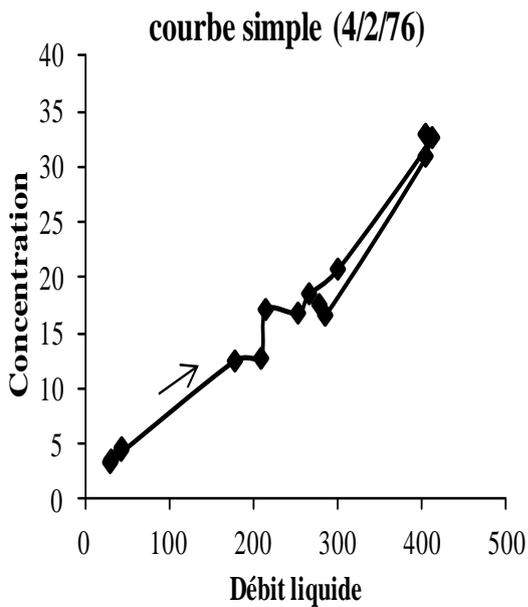
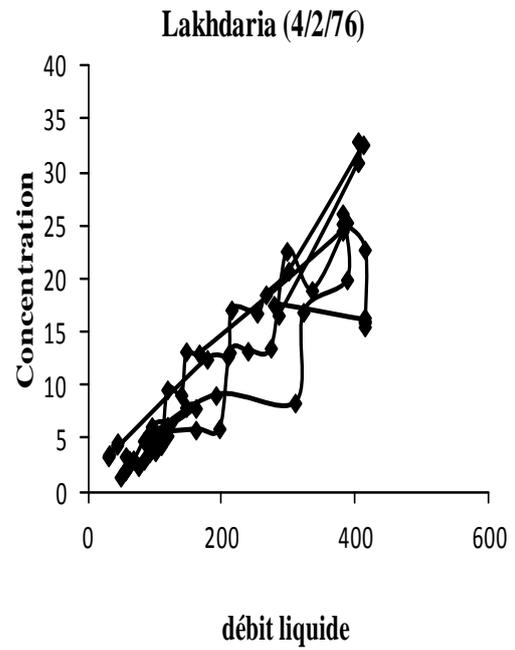
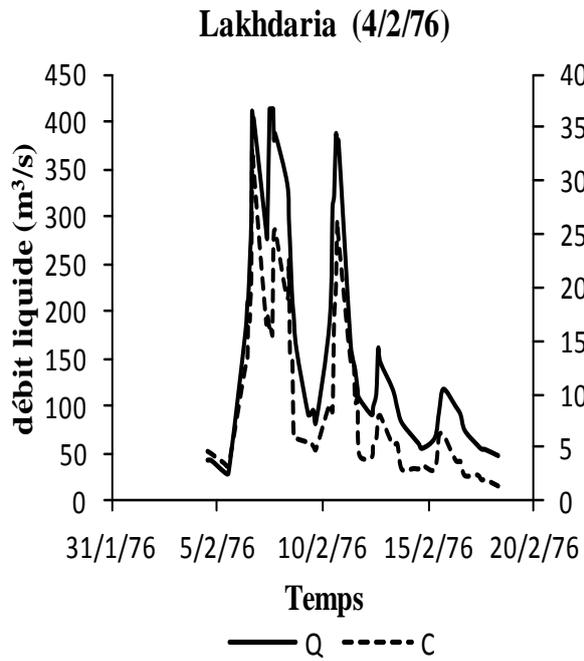


Figure 3.7 : Exemples des hystérésis de forme complexe.

Dans ce qui suit, on a essayé de décortiquer la crue observée à Lakhdaria (4/2/76). On trouve une succession de formes : courbe simple, forme négative, forme en huit, forme négative, forme en huit puis à la fin une forme positive. Cette événement de forme complexe rassemble quatre formes différentes, forme simple (classe 1,2 et 3) à un seul pic et même forme combinée à multi-pics (classe 4) (fig. 4.8)



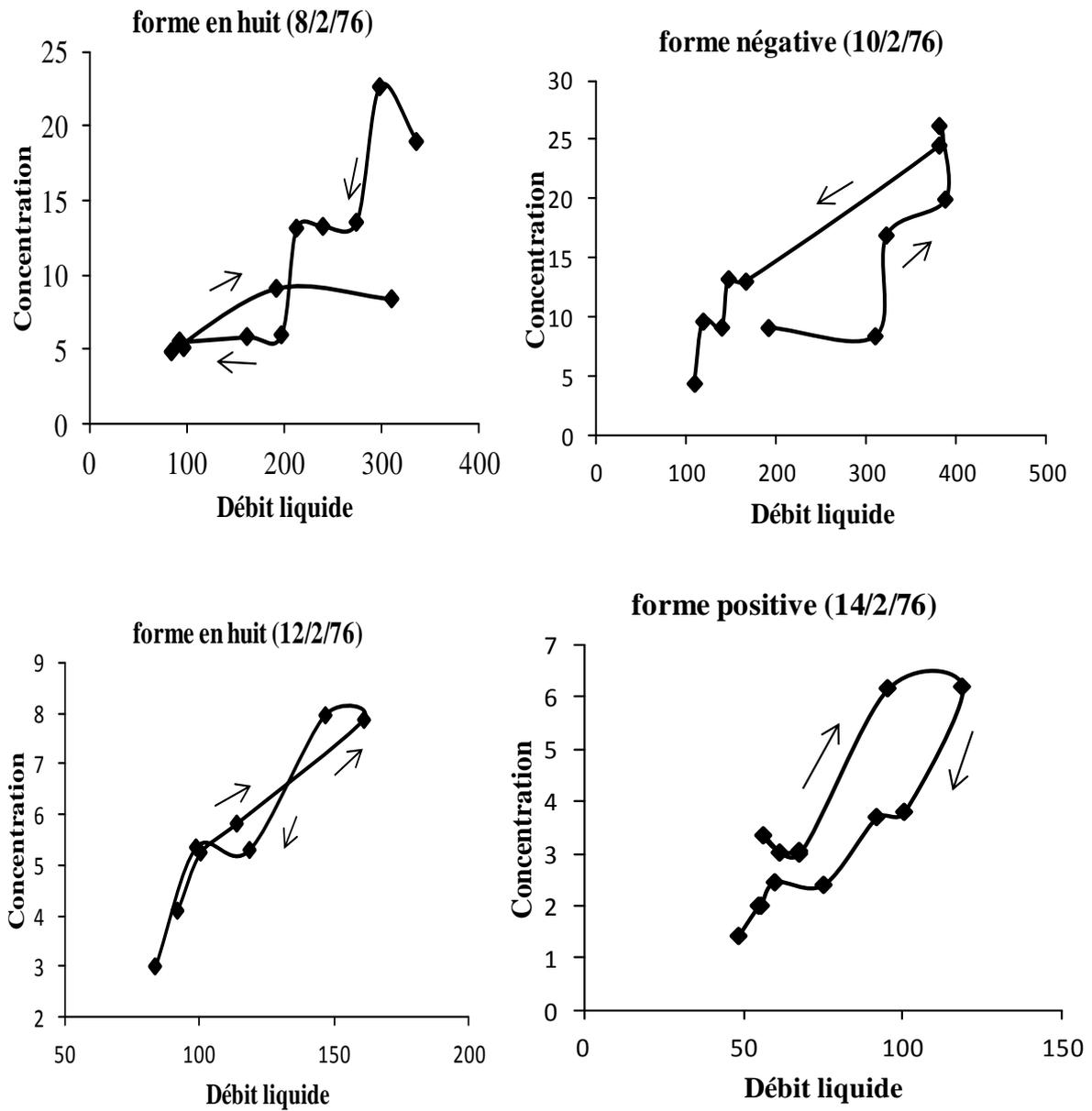


Figure 3.8 : Exemple de décomposition d'une courbe complexe en courbes simples

CHPITRE IV

ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION PRODUIT DANS LE BASSINVERSANT DE LAKHDARIA

4. Chapitre

Etude du transport solide en suspension produit dans le bassin versant de Lakhdaria

4.1. Introduction :

Pour mieux comprendre l'importance et l'état du transport solide en suspension dans la région d'étude, on opte pour l'estimation des apports liquides et solides et étudier leurs évolution temporelles durant les événements de crue sur une longue période.

L'étude est basée sur le dépouillement d'une série de mesures du débit liquide et concentration des sédiments en suspension est menée sur l'Oued Isser à Lakhdaria. La série couvre une période de 30 années, allant de septembre 1971 à août 2001. L'évolution des apports liquides et solides est analysée aux échelles temporelles : instantanée, événementielle, saisonnière et annuelle. A chaque pas de temps, on établit les statistiques sur les classes caractérisant les crues notamment en apport en eau et en sédiment. Les principaux processus qui conditionnent et favorisent la production des sédiments sont également présentés.

4.2. Variabilité instantanée :

A chaque échantillon prélevé dans le cours d'eau lui correspond un triplet (t_i, Q_i, C_i) où t_i (en seconde) représente la date de prélèvement de l'échantillon, Q_i (en m^3/s) et C_i (en g/l) sont le débit et la concentration mesurés à la date t_i .

Le débit solide, Q_s (kg/s) est estimé par le produit, $Q_s = C \times Q$ La fréquence des prélèvements est adaptée au régime hydrologique. Ces derniers sont effectués une fois tous les deux jours et intensifiés jusqu'à un intervalle de 30 minutes en période de crue.

Entre deux mesures de prélèvement consécutif réalisées aux temps $t(j)$ et $t(j+1)$, l'apport liquide, A_L (m^3), (respectivement, l'apport des matières solides en suspension, A_s , en tonne) est évalué par le produit de la moyenne des débits liquides (respectivement, débits solides en suspension) mesurés aux temps $t(j)$ et $t(j+1)$, multipliée par l'intervalle de temps.

Par interpolation linéaire, l'apport en eau et en sédiment correspondants à chaque triplet (t_i, Q_i, C_i) sont calculés par les équations (Eq. 4.1 et 4.2)

$$\Delta t(j+1, j) = t(j+1) - t(j) \quad (\text{en } s^{-1}).$$

$$A_L(1+j, j) = \frac{1}{2}(Q(j+1) + Q(j)) \Delta t(j+1, j) \quad (4.1)$$

$$A_S(1+j, j) = \frac{1}{2}(Q(j+1) C(j+1) + Q(j) C(j)) \Delta t(j+1, j) \quad (4.2)$$

$$A_{SS}(1+j, j) = \frac{A_S(1+j, j)}{S}$$

Avec A_{SS} : apport solide spécifique (t/km²/an)

La moyenne de la concentration de la charge solide en suspension est mesurée par deux approches:

La 1^{ère} approche est donnée par le calcul de la moyenne aréthmétique des concentrations :

$$\bar{C}_T = \frac{\sum C_i}{N}$$

La deuxième approche consiste à calculer la concentration moyenne par le rapport des apports solide et liquide :

$$\bar{C} = \frac{A_S T}{A_L T}$$

Les apports en eau et en sédiments donnés par les équations (Eq. 4.1 et Eq. 4.2) sont classés en ordre décroissant. La juxtaposition des courbes des cumuls est présentée dans (fig. 4.1). On remarque que le transport des sédiments s'effectue en des temps très courts. En moyenne annuel 91% de la charge solide en suspension transite par l'exutoire en 5% du temps annuel (fig.4.1). Alors que 1% du temps annuel suffit à évacuer 64% de la charge solide annuelle. Contrairement à cela, le transfert d'eau nécessite plus de temps que le transfert de la charge solide. En moyenne, 10% du temps annuel est nécessaire pour évacuer 76% de l'apport en eau.

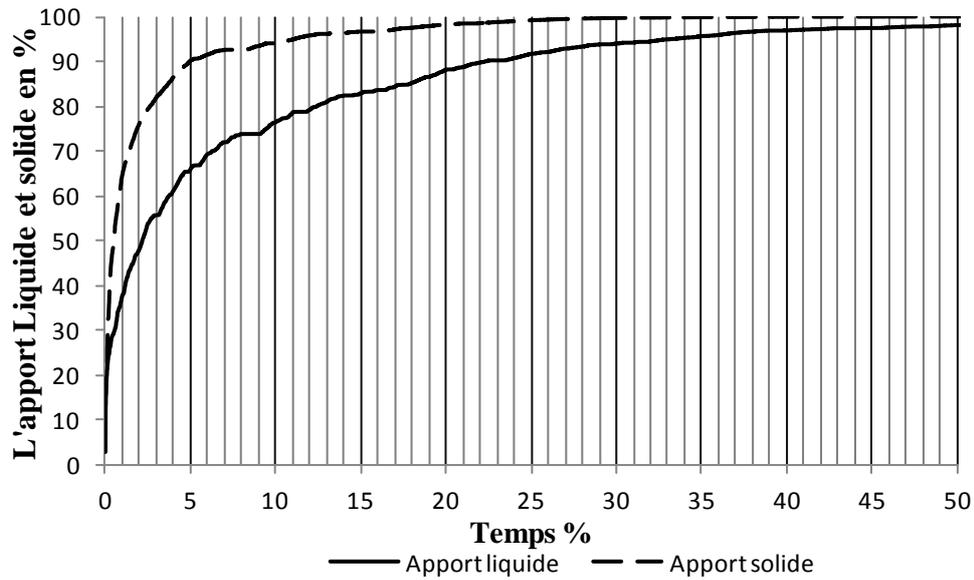


Figure 4.1 : Cumul des apports classés en eau et en matières solide en suspension drainés par Oued Isser pour période (septembre 1971-Août 2001).

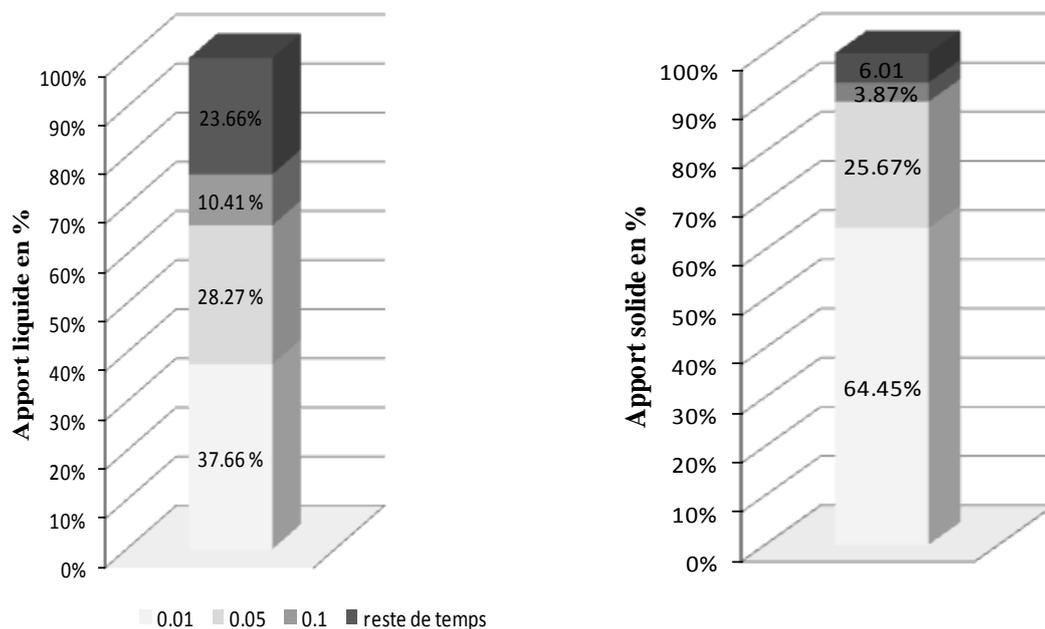


Figure 4.2 : Apports en eau et en matières solide pour les tranches de temps 1, 4, 5 et 10% du temps annuel, calculés à partir des cumuls drainés par Oued Isser pour période (septembre 1971-Août 2001).

Les contributions des apports en eau et en sédiment par rapport au temps calculées pour l'Oued Isser à Lakhdaria sont similaires à ceux trouvés dans d'autres cours d'eau de la région, comme ceux de l'Oued Sebdo (Megnounif et al., 2007). Walling et al, (1992) rapportent que souvent près de 90% de la charge solide est transportée lors des événements de crues en un temps court avoisinant 5% du temps annuel. Alexandrov & Larrone (2003), Reid et Frostki (1987) et Castillo (2003) font remarquer que dans les régions arides et semi-arides les écoulements dans les petits cours d'eau sont encore plus brefs et plus violents et transportent de grandes quantités de sédiments en des lapses de temps très courts.

4.3. Variabilité à l'échelle événementielle :

4.3.1. Principales caractéristiques :

Pendant la période de 30 ans allant de septembre 1971 à août 2001, on a enregistré 377 crues. Leur contribution en eau est à hauteur de 74,52 % par rapport à un apport annuel moyen de 494 millions de m³. Alors qu'elles ont transporté la quasi-totalité, soit 96,95% du flux annuel moyen des sédiments évalués à 9,6 millions de tonne. La figure 4.3, montre la contribution des événements de crue dans les apports liquides et solides selon le type de crue défini à travers les six classes étudiées dans les chapitres 2 et 3, est résumé dans le tableau 4.1..

La statistique des formes montre que le nombre des événements correspond à la classe 2 et classe 3 (forme positive et forme négative) représente la majorité avec un nombre de 136 crues équivalent à 69,8%, arrivant à mobiliser 61,86% des apports liquide et 64,71% des apports solide.

Les formes combinées en huit et complexe (classe 4 et classe 6) totalisent 94 crues soit 24,9% de nombre total. Elle mobilisant ainsi 35,56% des apports liquide et 33,6% des apports solide.

Les trois autres classes (courbe simple, courbe simple plus boucle positive, courbe simple plus boucle négative) sont rares et mobilisent un très faible pourcentage des apports liquide et solide.

Durant les 30 années d'étude, la charge la plus importante est produite par la forme simple positive, avec une contribution estimée à 102 millions tonnes soit 36,5% de la production totale transportée par le 1/4 des apports en eau soit 3583 Hm³ de l'écoulement total.

Les 63,5% de la charge solide restante sont réparti comme suite, forme négative mobilisent 28%, celles de forme en huit 22% et 11% est produite par les crues ayant une forme complexe. Par contre les autres formes, c'est-à-dire la forme courbe simple et courbe simple plus boucle n'arrivent à mobilisée que 2% de cette charge solide.

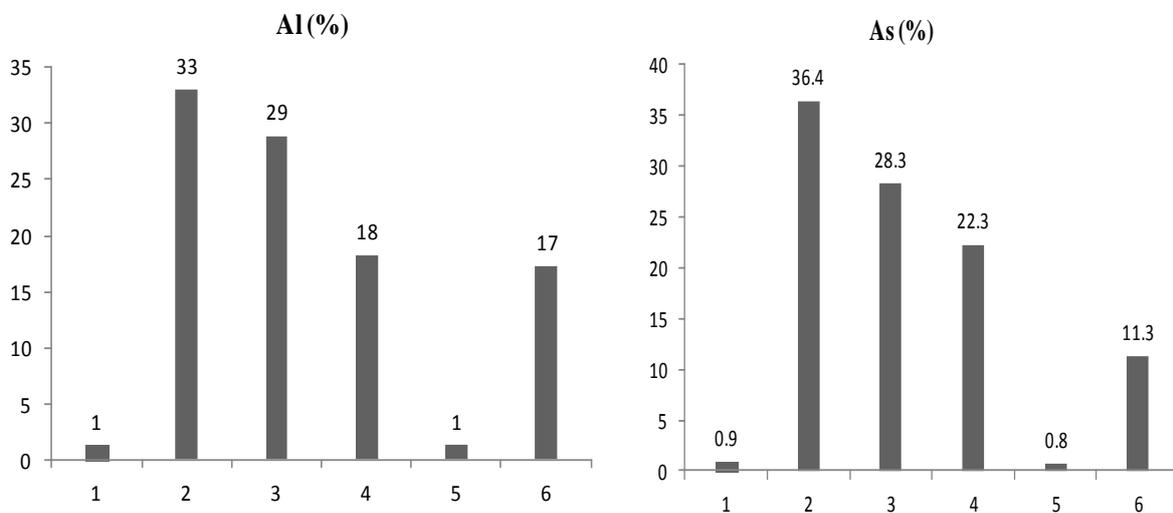


Figure 4.3 : Contribution des apports liquide et solide suivant les formes d'hystérésis.

Tableau 4.1.: Statistique sur les crues et leurs contributions en apports en eau et matières solides en suspension suivant le type d'hystérésis (période septembre 1971- août 2001)

Classe	Nombre	Al (hm ³)	Al%	As (MT)	As %
Classe 1	9	141,4	1,30	2,66	0,95
Classe 2	112	3583,6	33,00	102,04	36,44
Classe 3	151	3134,4	28,86	79,17	28,27
Classe 4	59	1981,1	18,24	62,33	22,26
Classe 5	11	138,8	1,28	2,10	0,75
Classe 6	35	1880,5	17,32	31,74	11,33
Total	377	10859,8	100	280	100

4.3.2. Processus dominants :

Le bassin versant de l'oued Isser intègre un ensemble des processus qui opèrent dans la région ainsi leurs interactions. De ce fait la contribution des versants est significative ainsi que celle du lit des berges de cours d'eau.

La charge solide provenant des versants est soit mobilisée par le lessivage (le wash load), ou par remise en suspension, elle est due à plusieurs mécanismes.

L'apport solide est très important pour les deux classes 2 et 3 (forme positive et négative) : 102 tonnes et 79.2 tonnes ; voir aussi les deux classes de forme combinée 4 et 6 (forme de huit et forme complexe) : 62.3 millions de tonnes et 31.7 millions de tonnes et les deux autres enregistrent de faibles valeurs par contre la concentration des eaux par classe enregistre une valeur extrême pour la classe 4 avec 31,4 g/l et la concentration moyenne est de 22,6 g/l (Tableau 4.2.).

Tableau 4.2.: Contribution de l'apport solide et de la concentration suivant le type d'hystérésis pour le bassin versant de Lakhdaria (période septembre 1971- août 2001)

<i>Classe</i>	<i>C (g/l)</i>	<i>As (Mt)</i>
Classe 1	18,8	2,6
Classe 2	28,4	102
Classe 3	25,2	79,2
Classe 4	31,4	62,3
Classe 5	15,1	2,1
Classe 6	16,8	31,7
Moyenne	22,6	46,6

4.4. Variabilité à l'échelle saisonnière :

4.4.1. Automne :

En automne les crues se manifestant par une forme simple à un seul pic, positive à 29,6% et négative à 37,7%, classe 2 et classe 3, sont fréquentes. Les crues de forme positive arrivent à mobiliser 42% de l'ensemble des apports solide enregistrées durant cette saison. Ce type de crue à transporté 53.86 millions de tonne, dont 77% montrent des ouvertures prononcées. Les crues ayant une forme négative ou en huit représentent 59,9 % des crues enregistrées durant cette saison d'automne et transportent 44% des apports solide.

La figure 4.4, montre la contribution des événements de crue dans les apports liquides et solides selon le type de crue défini à travers les six classes durant la saison d'automne, est résumé dans le tableau 4.3.

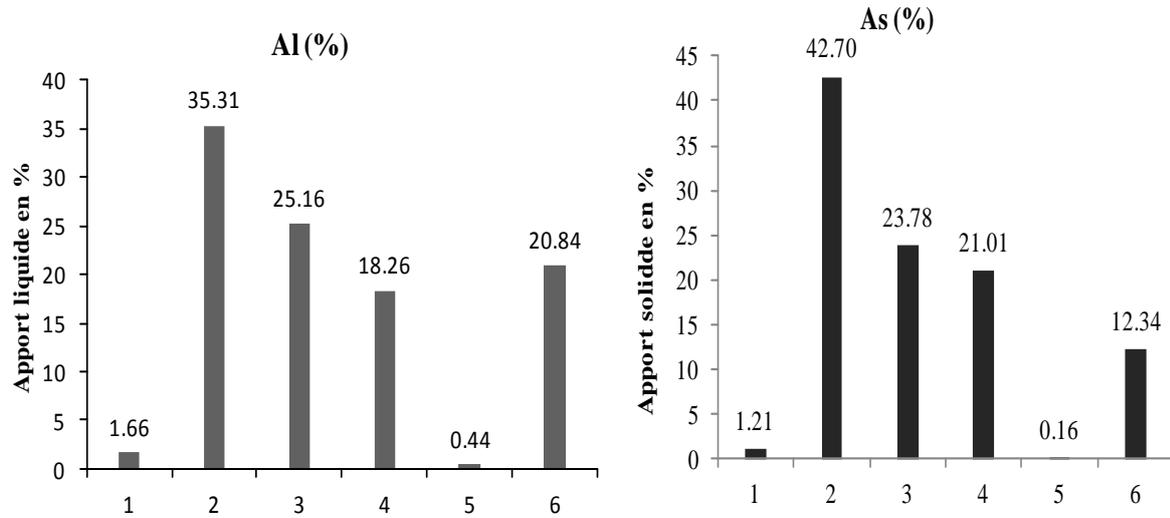


Figure 4.4: Contribution des apports liquides et solides suivant les formes d'hystérésis pour la saison « d'automne ».

Tableau 4.3 : Bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison d'automne

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	somme
Al (Hm ³)	35,7	759,3	541	392,6	9,3	448,2	2186,3
As (Mt)	1,5	53,8	30	26,5	0,21	15,5	127,6

Processus dominants

La charge solide enregistrée pour la saison d'automne est de 127 million de tonnes représentant 43% des apports totaux.

Pour l'automne la forte charge s'explique par le fait que les précipitations souvent intenses, tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation (Rose et al, 1999 ; Consandey et al, 2002).

Après la saison sèche, Plusieurs processus contribue et favorise une fourniture sédimentaire facilement mobilisable par les premier crues automnales : la destruction du couvert végétal, les poussières cumulé par l'érosion éolienne qui déstabilise la matrice fine du sol, l'effet splash par les gouttes de pluies sur les sols nus et desséchés et l'éclatement des agrégats par l'humectation rapide des sols,... etc.

- Le taux d'humidité peut devenir très faible à la surface d'un sol asséché par le vent. Ce qui entraîne la dessiccation des horizons superficiels, la disparition du couvert végétal et favorise l'éclatement des agrégats lors d'une humectation rapide générée par des pluies soudaines, cet éclatement est provoqué du fait de la remontée de l'air qui se comprime dans la porosité du sol sous la pellicule saturée d'eau en surface (Barthèses & Roose, 2001).
- Le manque de couvert végétal permet au vent de prendre la vitesse et d'accroître les tensions de frottement susceptible de détacher les particules à la surface du sol et de les mettre en mouvement sur des grande distance.
- , l'effet « Splash » est accompagné par le rejaillissement des particules de sol. provoque l'éclatement des agrégats, chaque goutte de pluie possède une énergie cinétique de vitesse de chute et de son poids. Cette énergie libérée est opposée aux forces de cohésion du sol, elle peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface. Ce mécanisme nécessite une pluie d'une certaine énergie variable selon le type de sol (Kinnell, 2005).

Par ailleurs, les sols compacts favorisent le ruissellement superficiel au détriment de l'infiltration et l'alimentation des nappes. Ce qui augmente l'érosion mécanique par le ruissellement superficiel et génère des écoulements fluviaux très chargés. De ce fait, la contribution des versants dans la production des sédiments est importante en automne et explique la dominance des crues de type classes 2 et 3.

4.4.2. Hiver:

En hiver les crues se manifestant par une forme simple à un seul pic, positive à 38 % et négative à 35,7%, classe 2 et classe 3, sont fréquentes.

En cette saison d'hiver, on remarque une répartition presque uniforme des apports solides, pour les trois classes 2, 3 et 4 (positive, négative et forme de huit) enregistrant successivement : 27,42, 30 et 26,5 millions de tonnes représentant la majorité avec 84,2% ainsi que considérable pour les apports liquides (fig.4.5). La classe 6 (forme complexe) est moins importante mais assez considérable avec un apport solide de 15,57 million de tonnes et un apport liquide de 775 Hm³. Par contre les deux autres formes (courbe simple et courbe plus boucle) représentent qu'une très faible partie 1,5% et 0,2% successivement.

La figure 4.5, montre la contribution des événements de crue dans les apports liquides et solides selon le type de crue défini à travers les six classes durant la saison d'hiver, est résumé dans le tableau 4.4.

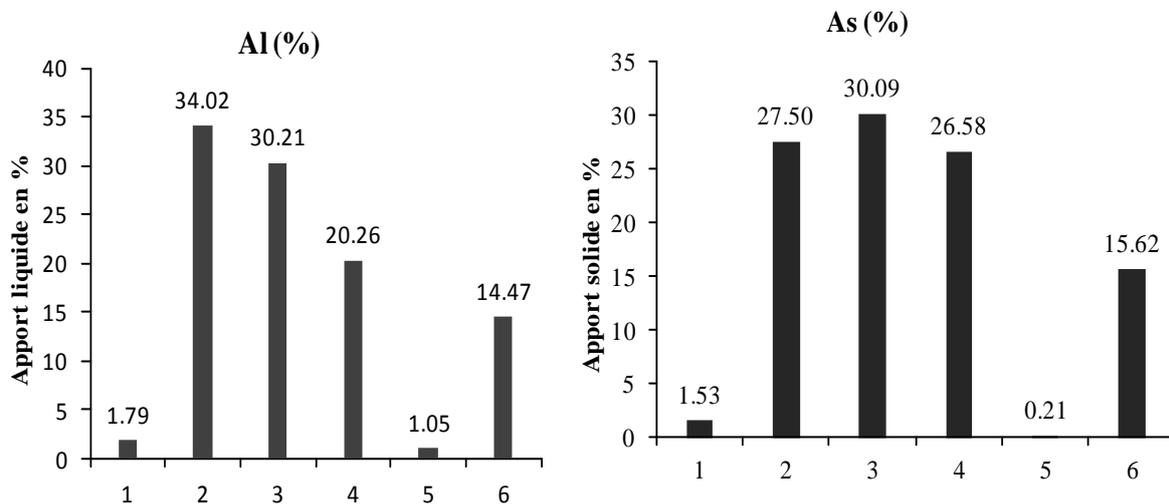


Figure 4.5 : Contribution des apports liquides et solides suivant les formes d'hystérésis pour la saison d'hiver.

Tableau 4.4 : Bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison « d'hiver »

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	somme
Al (Hm ³)	96,13	1823,48	1619,27	1086,09	56,33	775,62	5456,92
As (Mt)	1,53	27,42	30,04	26,50	0,21	15,57	101,22

Processus dominants :

À l'hiver, l'érosion du lit et des berges du cours d'eau devient importante en raison de l'augmentation des débits dans le chenal de l'oued, mais aussi les écoulements sont générés par des séquences pluvieuses relativement abondantes mais de faibles intensités et qui couvrent l'ensemble du bassin versant. Elles trouvent un sol meuble avec une couverture végétale qui confère une rugosité au sol et favorise la rétention de l'eau. Les racines des plantes facilitent alors l'acheminement de l'eau vers les réservoirs souterraines à travers les failles et la formation Karstique.

De ce fait, cette période se distingue par une production modérée en sédiments proviennent essentiellement des réseaux hydrographique.

4.4.3. Printemps:

En printemps les crues en forme négative, Classe 3, sont fréquentes. Elles représentent 44% de l'ensemble des crues enregistrées durant cette saison. Ce type de crue à transporté 35% de l'apport solide de l'ensemble des crues enregistrées durant cette saison, représentant 13,54 millions de tonne. Les crues ayant une forme positive transportent 11,1 millions de tonne représente 21,5% de l'ensemble des crues.

Les crues ayant une forme combinées à multi-pique, complexe ou en huit représentent 28% des crues enregistrées en Printemps qui transport 7,8 millions de tonne.

La figure 4.6, montre la contribution des événements de crue dans les apports liquides et solides selon le type de crue défini à travers les six classes durant la saison Printemps, est résumé dans le tableau 4.5.

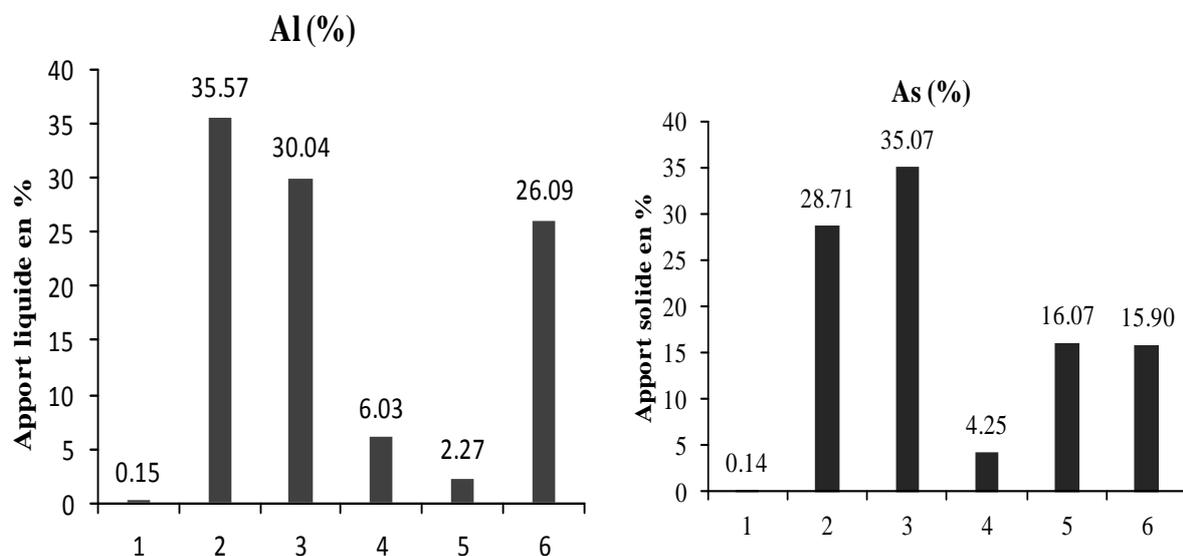


Figure 4.6: Contribution des apports liquides et solides suivant les formes d'hystérésis pour la saison de printemps.

Tableau 4.5 : Bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison de « printemps »

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	somme
Al (Hm ³)	3,9	913,8	771,7	154,7	58,2	670,1	2572,6
As (Mt)	0,05	11,1	13,5	1,6	6,2	6,1	38,6

Processus dominants :

Au printemps, l'érosion du lit et des berges du cours d'eau devient importante en raison de l'augmentation des débits dans le chenal de l'oued et au développement de la végétation sur les versants. Cette végétation assure une meilleure protection des soles contre l'érosion hydrique (Megnounif, 2007) L'érosion des berges et du lit fournit ainsi plus des sédiments en suspension que la dégradation des versants, la forme négative mobilise 13,5 millions tonnes des apports solides représentant 35% des apports totaux de cette saison.

A la fin du printemps, le sol est humide et la couverture végétale bien développée. Sur les versants, les sols minces se saturent rapidement et développent une érosion importante en ravine et de mouvement de masse (Rose et al, 1998,1999). De plus, à cette période, les crues ont un rôle important dans la production des sédiments dans les réseaux de drainages. Suite à des évènements importantes avec hausse considérable de la hauteur d'eau, l'arrivée de crue, bien que modérée, peut provoquer des affouillements au pied des berges. Selon Heush (1971), à la fin du printemps, les effondrements des berges et les mouvements de masse sur les sols minces sont fréquent.

4.4.4. Eté :

En été les crues se manifestent par une forme négative, Classe 3, sont fréquentes. Elles représentent 55,5% de l'ensemble des crues enregistrées durant cette saison. Ce type de crue à transporté 58,6% de l'apport solide de l'ensemble des crues enregistrées durant cette saison, représentant 16,5millions de tonne. Les crues ayant une forme positive transportent 9,6 millions de tonne représente 22,2% de l'ensemble des crues.

Pour cette saison d'été les valeurs de la charge solide sont très faible enregistrer pour la pluparts des formes (courbe simple, forme de huit, courbe simple plus boucle et courbe complexe), avec une répartition presque homogène. La figure 4.7, montre la contribution des

événements de crue dans les apports liquides et solides selon le type de crue défini à travers les six classes durant la saison d'été, est résumée dans le tableau 4.6.

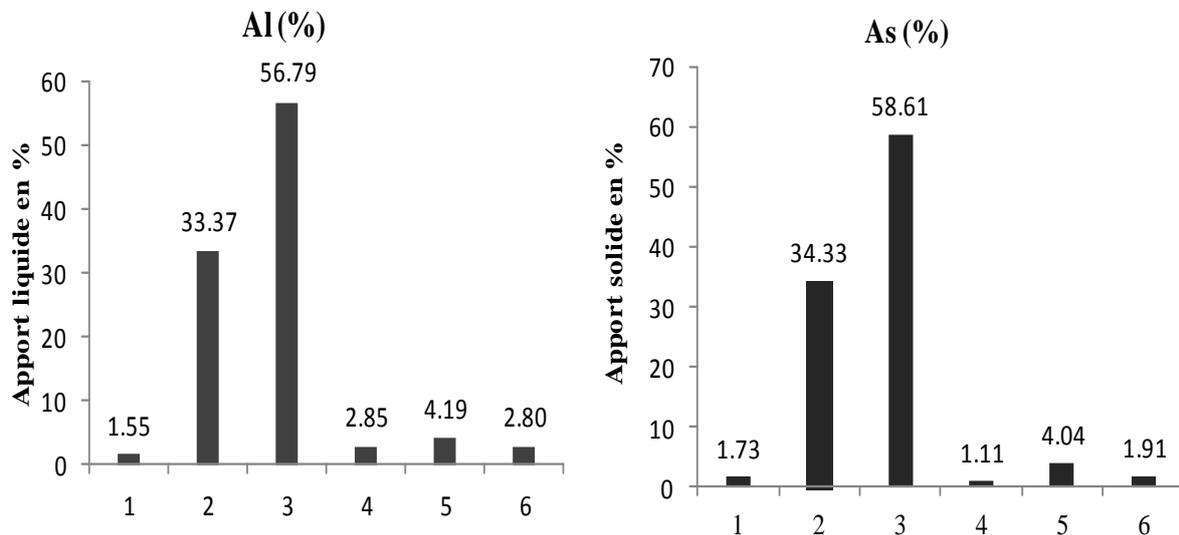


Figure 4.7 : Contribution des apports et liquides et solides suivant les formes d'hystérésis pour la saison d'été.

Tableau 4.6 : Bilan des apports liquides et solides suivant les formes pour la saison « d'été »

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	somme
Al (Hm ³)	5,5	118,9	202,3	10,1	14,9	9,98	356,3
As (Mt)	0,49	9,6	16,5	0,31	1,1	0,54	28,6

Processus dominants :

En été, lorsque les débits diminuent dans le chenal, les sédiments proviennent exclusivement de l'érosion des versants lors des épisodes orageux.

L'été se distingue des autres saisons, par des valeurs très dispersées, de pluviométrie faible à nulle sans conséquences généralement sur le transport solides, mais parfois des orages estivaux ramène des quantités considérables de matières en suspension.

4.5. Variabilité saisonniers des apports liquides et solides

La répartition saisonnières (tableaux 4.9, fig.4.7) des apports solides confirme une grande variabilité intra-annuelle. Toutefois, l'essentielle de la charge en suspension des crues, soit 74% de la production annuelle, est transportée en automne à hauteur de 45% et en hiver à hauteur de 29%. Alors que la production du printemps et de l'été est faible et ne cumule que 26% de flux annuel à hauteur de 15 et 11% transportée respectivement durant le printemps et l'été (fig.4.7).

Au hivers la charge en suspension n'augmente pas proportionnellement aux apports pluviométrique si bien que les flux saisonniers reste inférieur à celui mesuré en automne malgré une hausse très significative des totaux pluviométrique (45%), mais elle présente des caractéristiques érosive plus prononcée avec 29% des apports solides avec une dégradation spécifique saasonnière de 782,44 t/km² (Tableaux 4.9).

Donc contrairement à d'autre région (Probst et al, 1992), au Magrheb, les plus fortes charges solides en suspension ne se produit pas néssecerment durant les périodes des hautes eaux.

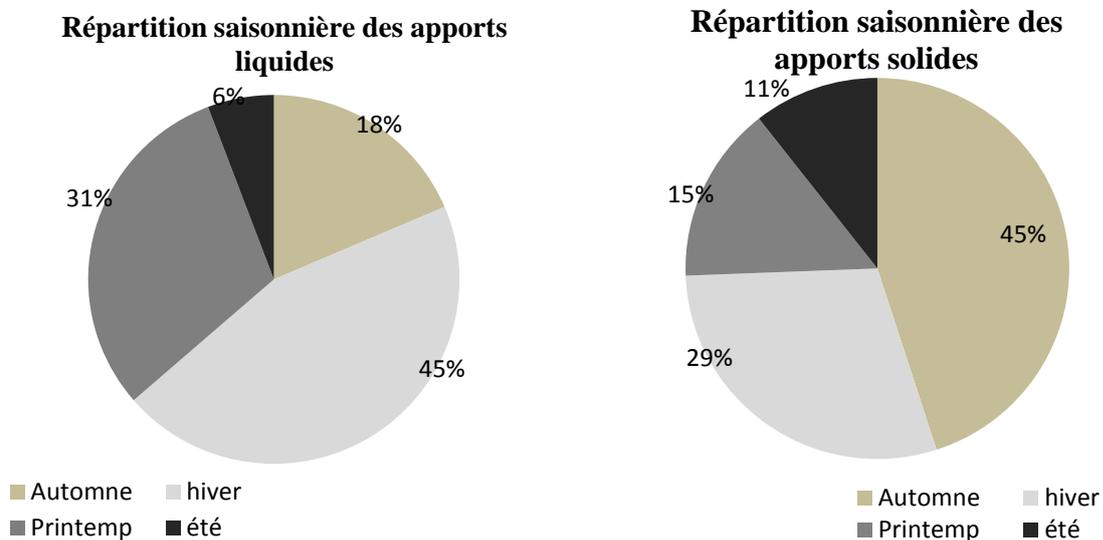


Figure 4.8 : Répartition saisonnières des apports liquides et solides de Oued Isser (période Septembre 1971/ Août 2001).

Tableau 4.7 : Apports liquides et solides moyens saisonnières à Oued Isser (période Septembre 1971/ Août 2001) :

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
AL (Hm ³) total	91,6	222,2	151,1	28,4	404,3
A _s (Mt) total	4,33	2,83	1,45	1,02	10,4
A _{ss} moyenne (t/km ²) total	1198,6	782,5	399,8	281,9	2891,8
AL (Hm ³) crue	69,5	122,5	102,8	13,2	308
A _s (Mt) crue	4,25	2,1	1,35	0,81	8,5
A _{ss} (t/km ²) crue	1175,9	578	374,5	223,2	2351,6

Le tableau 4.8 représentant les statistiques des classes d'hystérésis par saison, il montre que la forme négative ,qui est d' une forme simple à un seul pic,est dominante dans toute les saisons varie de 35% pour la saison d'hiver jusqu'à 56% pour la saison d'été, suivie par la forme positive qui elle aussi considerable et d'une forme simple avec une moyenne de 30%. La troisième forme simple, courbe simple, represente qu'une faible portion durant toute les saisons et ne depasse pas les 4%.

Pour les formes combinées monopic et multipic sont de faible apparition mais arrivent à 17% pour la forme en huit pour la saison d'automne et hiver et 14% pour la forme complexe pour la saison de printemps.

Tableau 4.8: Statistiques des classes par saison

	Classe1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5		Classe 6	
Automne	5	4,1%	36	29,5%	46	37,7%	21	17,2%	3	2,4%	11	9%
Hiver	2	1,6%	48	38,1%	45	35,7%	22	17,4%	1	0,8%	8	6,3%
Printemps	1	0,98%	22	21,5%	45	44,1%	14	13,7%	5	4,9%	15	14,7%
Eté	1	3,7%	6	22,2%	15	55,5%	2	7,4%	2	7,4%	1	3,7%
Somme	9	2,4%	112	29,7%	151	40%	59	15,6%	11	2,9%	35	9,3%

4.6. Variabilité à l'échelle annuelle :

L'oued Isser d'une superficie de 3615 km², draine en moyenne annuelle total 492,7 million m³ d'eau véhiculant en moyenne annuelle total une charge solide en suspension de l'ordre de 9.15 millions de tonnes correspondant à une dégradation spécifique de 2602,8 t/km²/an par la variabilité interannuelle des dégradations spécifiques est considérable.

Durant les 30 années d'étude, on a enregistré 377 crues. Ce qui donne une moyenne de 13 crues le long de chaque cycle hydrologique. Toutefois se nombre est très variable, et atteint jusqu'à 20 crues par an. Les crues représentent en moyenne annuelle moins de 3 mois d'écoulement, soit 21,35% de temps annuel. La crue du 25/12/84 est la plus longue crue enregistrée durant la période d'étude. Elle a durée 20 jours. La durée moyenne entre deux crues consécutives est estimé 42 jours. Cet intervalle dépasse parfois les 4 mois, comme celui de 153 jours séparant la crue de 22/4/73 et celle de 24/9/73.

Au cours du cycle hydrologique, les apports en eaux et en matières solides transportés en suspension par l'oued Isser ; (tableau 2) montrent les résultats suivantes :

- La contribution des crues dans l'apport annuel en eau est estimée en moyen à 74,52%, sur un apport total de l'ordre de 493,71 millions de m³. Alors que le flux en matières solides transportées en suspension par ces dernières constitue la quasi-totalité, soit 96,95% du flux annuel moyen évaluée à 9,65 millions de tonnes.
- La moyenne arithmétique de la charge annuelle des eaux ramenées par l'oued Isser est de 15,6 g/l. Restreinte aux épisodes de crues, la moyenne passe à 29g/l. D'une année à une autre, la concentration annuelle moyenne est très variable. Elle oscille entre 9,47g/l enregistrée durant l'année de 1983-1984, et 59 g/l pour l'année 1989-1990.
- Par contre, la concentration moyenne interannuelle calculer par la division de l'apport solide sur l'apport liquide est 27,8 g/l. Restreinte aux crues, elle passe à 32,6 g/l. Elle aussi accuse une forte variabilité, entre 8,2 g/l pour l'année 1980-1981, jusqu'à 62,8 g/l pour l'année 1996-1997.

- L'irrégularité interannuelle des apports liquides et solides est bien marquée (figure 4.9 et figure 4.10). Pour les années 1971-1972, 1972-1973 et 1982-1983 les apports aussi bien liquide que solide sont plus importants par rapport au reste de la période. Toutefois, on peut distinguer deux périodes de sécheresses, la première est située entre 1974 à 1982, la seconde entre 1990 à 2001. Durant cette dernière, la production des sédiments est plus importante que celle de la première période.
- Toutefois, l'année 1971-1972 et 1982-1983 sont assez remarquables par leurs dégradations spécifiques qui sont de 6634,78 t/km².an et 7156,52 t/km².an, 3 fois plus grande que la moyenne annuelle qui est de 2602,88 t/km².an . (fig. 4.10)

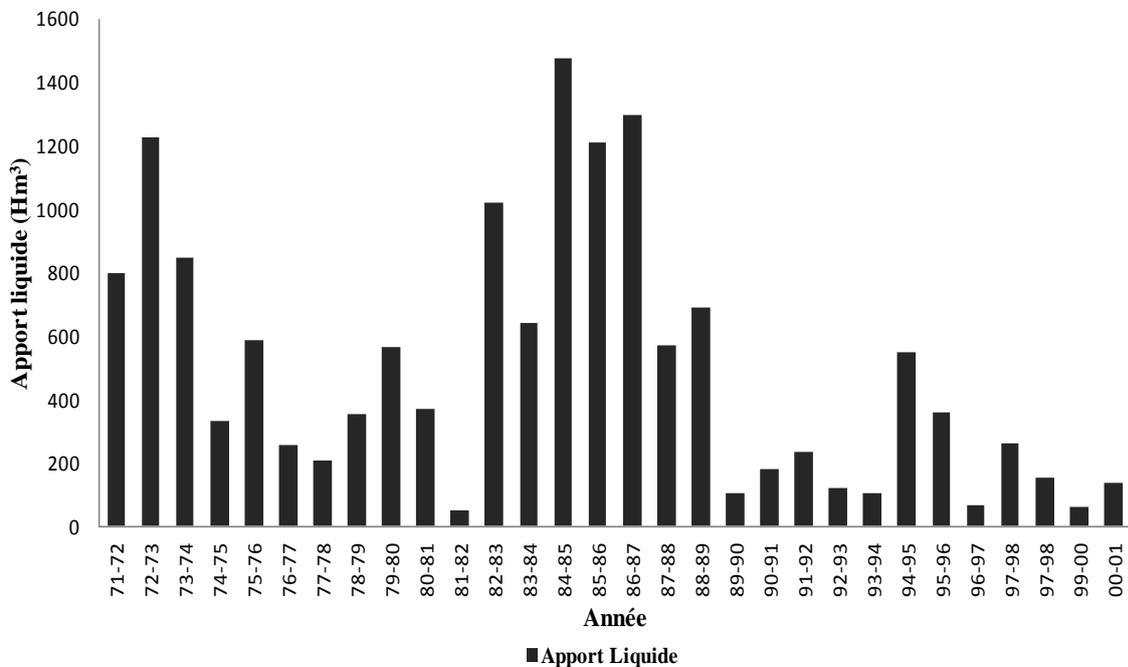


Figure 4.9: Apport Liquides annuels de Oued Isser à Lakhdaria (période Septembre 1971/ Août 2001).

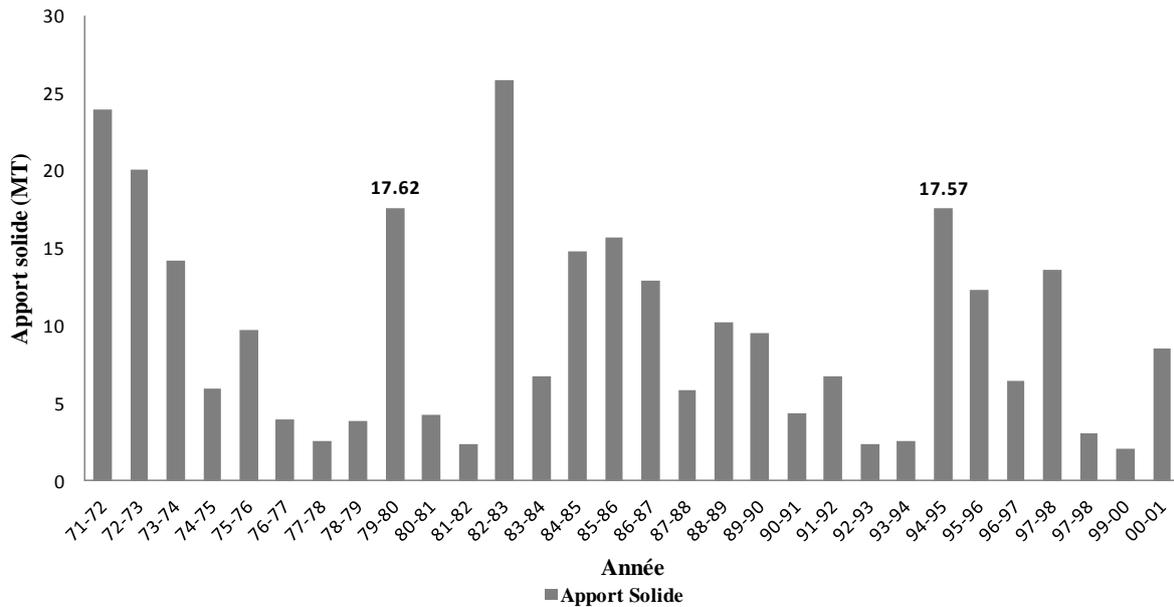


Figure 4.10: Apport Solides annuels de Oued Isser à Lakhdaria (période Septembre 1971/ Août 2001).

L'oued Isser, draine en moyenne annuelle 492,7 million m³ d'eau véhiculant en moyenne annuelle une charge solide en suspension de l'ordre de 9,15 millions de tonnes correspondant à une dégradation spécifique de 2602,8 t/km²/an par la variabilité interannuelle des dégradations spécifiques est considérable. Elle passe de 576 t/km² durant l'année 99/00 à 7156 t/km² pour l'année 82/83. Durant les 30 années d'étude, seule 3 années ont vu des dégradations spécifiques dépassant les 5000 t/km²/an (fig. 4.11)

En Algérie le taux d'érosion dépasse 2000 t/km²/an sur la plus part des bassins versants de l'Atlas Tallien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafrane, Isser) étudié par Demmak, 1982, pour quelque bassin Algérien, Megnounif et al (2003) estime une dégradation spécifique dans le bassin de la Haute-Tafna varie entre 24 et 4288, Boudjadja et al (2003) estime pour l'oued Allalah, oued Es Sebt et oued El Hachem successivement une dégradation spécifique de 2701 t/km²/an, 2950 t/km²/an et 2905 t/km²/an.

En se basant sur les travaux réalisés au Maghreb, Heusch & Millies-Lacroix (1971) estime que la dégradation spécifique dans les bassins versant varie entre 265 et 2569 t/km²/an, par contre Walling (1984) estime que les dégradations spécifiques dans les bassins versant varient entre 1000 et 5000 t/km²/an. Probest & Amiott-Suchet (1992) ont avancé des valeurs supérieures à 5000 t/km²/an pour cinq bassins versants, comme c'est le cas du bassin versant Agrioun en Algérie où la dégradation spécifique a été estimée à 7200 t/km²/an.

D'autre part, on trouve des valeurs de la dégradation spécifique nettement inférieure à celle estimée dans notre bassin de l'oued Isser, ont été observé dans certain bassin de Maghreb, Snoussi (1988) estime une dégradation spécifique moyenne dans les bassins versants du Maroc de 504 t/km²/an, Probst & Amiotte-Suchet ont estimé une dégradation spécifique moyenne variant de 400 à 610 t/km²/an pour les rivières qui se jette dans la mer Méditerranée et dans l'océan Atlantique pour 130 bassins versants des trois pays de Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie). Ou encore dans l'oued Elham en Algérie, bassin du Hodna (Hasbia et al, 2012), où la dégradation spécifique est estimée à 530 t/km²/an.

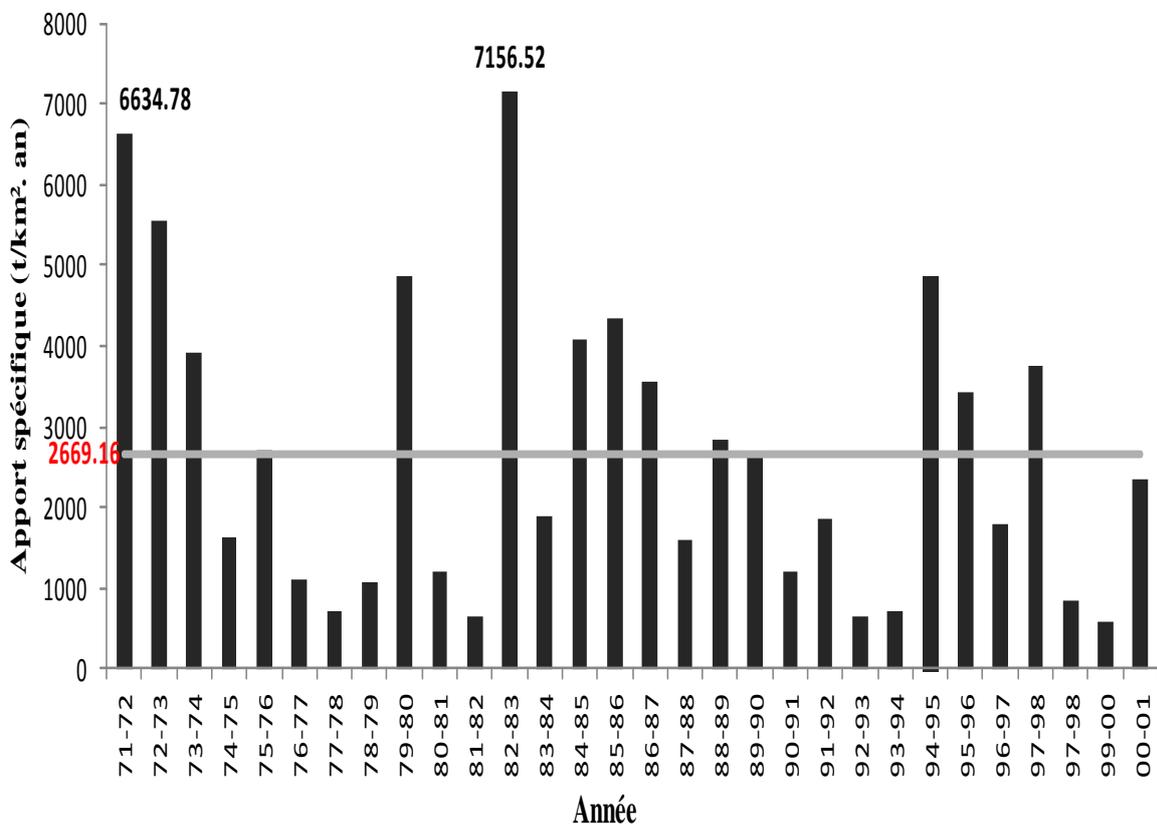


Figure 4.10: Dégradation spécifique annuels de Oued Isser à Lakhdaria (période Septembre 1971/ Août 2001).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

A l'échelle du bassin versant la production de la charge solide en suspension est influencée par les caractéristiques du bassin versant, de la variabilité du climat et des actions anthropiques. De ce fait, la relation, C-Q, entre la concentration de la charge solide en suspension et le débit liquide est souvent non synchrone et produit des formes en hystérésis.

En dehors de la courbe simple (single-valued line), on distingue cinq formes possible d'hystérésis : hystérésis positive (clockwise), hystérésis négative (counterclockwise), forme en huit (eight figure), courbe simple avec une boucle soit positive soit négative (single curve plus clockwise or counterclockwise loop) et forme complexe représentée par une courbe simple plus plusieurs boucles (single curve plus two loops or more).

L'analyse des formes des hystérésis est expliquée à partir d'exemples de crues enregistrées dans quatre bassins versants situés dans le nord de l'Algérie, un à l'ouest, un au centre et deux à l'est du pays.

Une étude détaillée des apports en sédiments à l'échelle événementielle et des formes d'hystérésis produites a pu mettre en évidence le rôle des crues dans la genèse et le transport des sédiments en suspension dans le bassin d'Isser. Les résultats obtenus montrent que le transport des matières solides en suspension se fait principalement durant les épisodes de crues. En effet, sur un apport annuel moyen en eau, estimé à 493.7 millions de m³ les crues contribuent par 74.5%. Cependant, elles transportent la quasi-totalité, soit 96.95%, de la charge solide en suspension évaluée en moyenne annuelle à 9,65 million de tonnes.

Le transfert de la charge solide s'effectue en des temps très court qui correspondent généralement à la phase de montée des crues. On note que, 5% du temps annuel peut suffire pour évacuer 91% de la production annuel.

En ce qui concerne l'identification de la source des sédiments, l'étude montre que l'automne se distingue par une forte charge solide en suspension attribuée à une forte contribution des versants. Durant la période qui s'étale entre l'hiver et le printemps, les sédiments sont principalement arrachés des berges du cours d'eau ou résultent de la remise en suspension des dépôts antérieurs.

A la fin du l'hiver et jusqu'au printemps, la production de sédiment se fait principalement à des échelles locales par des mouvements de masse et les effondrements des berges.

L'étude montre en particulier que la concentration des sédiments est affectée par une mobilisation continue ainsi que par le stockage et la diminution spatio-temporelle des sédiments disponibles. Les sédiments transportés proviennent du lit et des berges par érosion ou glissement et des affluents tributaires. Le matériel du lit transporté en suspension à la station de mesure peut être influencé par les volumes, la hauteur, la puissance des crues précédentes. Quant à la production des sédiments sur les versants, elle dépend du couvert végétal et de la disponibilité des sédiments produits par différents mécanismes d'érosion.

La forme de la relation C-Q dépendent en partie du :

- Temps et le volume des sédiments provenant de différentes sources dans le bassin versant jusqu'à la station de mesure.
- La proximité de la source des sédiments par rapport à la station de mesure.

**REFERANCES
BIBLIOGRAFIQUES**

REFERANCES BIBLIOGRAFIQUES

- Achite M. Touaibia B. & Ouillon S., 2006. Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquence & Perspective. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environnement. Marrakech, Marocco (ISCO 2006),(6) 1-6.
- Agoumi A., 2002. Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Climate Change Knowledge Network, iisd, (11) 1-11.
- Alexandrov Y. and Laronne J.B, 2003. Suspended sediment transport in flash floods of the semiarid northern Neveg, Israel. IAHS publ., (278) 346-352.
- Asselman N.E.M, 1999. Suspended sediment exhaustion in a large drainage basin: the River Rhine. Hydrol. Process, (13) 1437-1450.
- Asselman N.E.M, 2000. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the river Rhine, hydrol. Process, (13) 1437-1450.
- Bača Peter, 2008. Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques, 53(1) 224-235.
- Bagnold R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. United States Geological Survey-Professional Paper 422-(I), Washington
- Barthèse B. & Roose E., 2001. La stabilité de l'agrégation un indicateurs de la sensibilité des sols au ruissellement et l'érosion : validation à plusieurs échelle. Cahiers, Agricultures, 10,185-193.
- Benkhalel A. & Remini B., 2003. Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'oued Wahrane (Algerie). Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques, 48(2), 243-255.
- Bouanani A., 2004. Hydrologie, Transport solide et modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 250p.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boudjadja A., Messhel M. & Pauc H., 2003. Ressources hydrauliques en Algérie du Nord, Revue des Science de l'eau, Vol.16, no 3, 285-304.
- Boughrara, A., 1986. L'érosion actuelle dans le Tell Oriental : le cas du bassin versant de l'oued Argiou. Thèse de 3^e cycle, Aix-Marseille II ,412p.
- Bourouba M., 1988. Hydrologie et érosion actuelle dans le Tell : le cas du bassin versant de l'oued Djendjen. Thèse de 3^e cycle, Aix-Marseille II ,404p.
- Bourouba M., 1993. Bilan de l'érosion des bassins versants de l'Algérie oriental. Travaux de l'institut de géographie de Riens, 85/86, 15-24.
- Brasington J. & Keith, R., 2008. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. Hydrological processes 14, 2559-2574.
- Bravard J.P, Petit, F., 2000."Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial ", coll. U-Géographie, Paris : Armand Colin, 222p.
- Castillo V.M, Gomez Plaza A. & Martinez-Mina M., 2003. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchements: a simulation approach. Journal of Hydrology, 284, 114-130.
- Chaumont M. & Paquin C., 1971. Carte pluviométrique de l'Algérie, éch. 1/50000. Soc. Hist. Not. Afrique de Nord, Alger. 4 feuilles. 1 notice.
- Consandey C., Bigot, S., Dacharry M., Gille E., Laganier R. & Salvador P.G, 2002. Les eaux courantes: Géographie et environnement Edition Bellin, Paris, 240p.
- Cote M., 1977. Mutation rurale en Algérie. 2^{ème} Ed, Office des publications Universitaires.
- Demmak A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et les transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Doct-Ing., Université P.M. curie, Parie 6, 323p.
- Derouiche G., 2007. Communication sur « les risques climatiques et agriculture algériennes ». Bureau National d'étude pour le Développement Rural (B.N.E.D.E.R). 12p
- Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats. Rec. trav. lab. bot. géol. zool. fac. Sein. Montpellier, sér.bot., 7 :3-43, 9 fig.
- Fournier, F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses Universitaires de France, Paris, 198p.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ghenim A. & Megnounif A., 2013. Ampleur de la sécheresse dans le Bassin d'Alimentation du Barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). Physico-Géo. Géographie physique et Environnement. Volume VII
- Ghorbal A. & Claude J., 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie : Estimation des Transport Solides. Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters. Proc-Paris Symp., I.A.H.S.Bull.,122, 219-232.
- Graf H. & Altinakar M.S., 2000. Hydraulique fluvial, écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple, Presses polytechniques et universitaires Romandes ; Vol 16, 628p.
- Halimi A., 1980. L'atlas Blidéen. Climat et étages végétaux. Ed O.P.U, Alger. 523p.
- Hannouche M. & Nechem D., 2010. Contexte géologique et hydrogéologique de la vallée de l'oued Kebir Ouest, Nord est Algérien. International Network Environmental Management Conflicts. Santa Catarina-Brazil, 1(1), 106-112.
- Hasbia M., Hedjazi A. & Benayada L., 2012. Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna : cas de sous-bassin versant de l'oued elham. Rev. Mars. Sci Agron. Vét. 1 : 28-32.
- Heusch B. & Millies-Lacroix A., 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au magreb. Mine et Géologie Rabat, 33, 21-39.
- Hudson P.F., 2003. Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico. Catena, 52:57-76.
- Imman D.L. & Jerbins S.A., 1999. Climate change and the episodicity of sediment flux of small California Rivers. Journal of Geology 107, 205-270.
- Khelifi H., 2002. Algérie les formations forestières et préforestières des montagnes d'Algérie : diversité et sensibilité. INA (Institut National Agronomique). 15p.
- Knighton A.D., 1998. Fluvial Forms and Processes. Edward Arnold, Baltimore, MD. 383 p
- Kouri L. & Vogt H., 1996. Détermination de la sensibilité des terrains marneux au ravinement au moyen de SIG : le cas du bassin versant de l'oued Mina (Tell Oranais). Bultin de l'Orostom 16, 412-438.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Larfi B. & Remini B., 2006. Le transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser. Impact sur l'envasement du barrage de Beni Amrane (Algérie). Larlyss Journal, ISSN 1112-3680, (05) 63-73.
- Lawler D.M., 2005. Turbidity dynamics during spring storm event in an urban headwater river system: the Upper Tame, west Midlands, Uk. Science of the total Environment, 360, 109-126.
- Lenzi M. A. & Marchi L., 2000. Suspended load during floods in a small stream dolomites (northeastern Italy). Cantena, 39,267-282.
- Ludwig W. & Probst J.L, 1998. River sediment discharge to the oceans: Present-day controls and global budgets. American Journal of Science 289, 265-295.
- Ludwig W., Roussiez V., Monaco A., Probst J.L, Bouloubassi I., Buscail R., & Saragoni G., 2006. Sources and sinks of sediment-bound contaminants in the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea) : A multi-tracer approach. Continental Shelf Research, 26, 16, 1843-1857.
- Mebarki, A., 1982. Le bassin de Kébir Rhumel. Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau. Thèse Doct. 3^e Cycle. Nancy II ,304p.
- Medinger G., 1950. Hauteurs de pluies en Algérie, moyenne 1913-1953 (recueil statistique).S.E.S., Alger.23p.
- Medjrab, A., 1998. Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale, eau et environnement en Tunisie et en milieu méditerranée. Colloque de Hammet (Tunisie) 14-15 Novembre 1998. Publication de l'université de Tunis I , et de Parie Sorbonne .p. 69-78.
- Megnounif A., 2007. Etude du transport des sédiments en suspension dans les écoulements de surface. Thèse de Doctorat , Université de Tlemcen.1271-1284
- Megnounif A., Ghenim A., 2013. Influence des fluctuations hydro-pluviométriques sur la production des sediments: Cas du Bassin de la Haute Tafna. Revue des sciences de l'eau 26(1), 53-62.
- Megnounif A., Terfous A. & Bouanani A., 2003. Production and transport of suspended sediment transport in the Upper-Tafna river basin (North West Algeria). Rev.Sci. Eau 16(3), 369-380.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Megnounif A., Terfous A., Ghenaim A. & Poulet J.B., 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the upper Tafna catchement, Algeria. *Hydrological Sciences-Journal-* , 52(6).
- Milliman J.D & Syvitski J.P.M., 1992. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: the Importance of small Mountainous Rivers. *The Journal of Geology*; 100:525-544.
- Milliman J.D. & Meade, R.H., (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* 91, 1-21.
- Nadjraoui D., 2001. Profil fourrager de l'Algérie. Université des Science et de la Technologie H. Boumedienne. 30p.
- Owens P. N., Walling D. E. & Leeks G. J.L., 1999. Deposition and storage of fine-grained sediment within the main channel system of the River Tweed, Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*.24, 1061-1076.
- Probst J.L. & Tardy y., 1985 . Fluctuations hydroclimatiques du bassin d'Aquitaine au cours des 70 dernières années. *Revue de géographie physique et géologie dynamique* 26, 61-77.
- Probst, J.L & Amiotte- Suchet, Ph., 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in Magreb (North Africa). *Hydrological sciences Journal*, 37, 6, 12. 661-637.
- Remenieras G., 1986. L'hydrogie de l'ingénieur. Editions Eyrolles, 459 p.
- Roose E., Arabi M. Chebbani M., Morshi B., 1998. Les montagnes méditerranéennes d'Algérie. Impact de l'intensification de l'agriculture de montagne sur l'environnement et les revenus. *ORSTOM Actualité spécial Erosion*, 56 : 26-27.
- Roose E., Chibbani R., Bourrougaa L., 1999. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Bull. ORSTOM, Rés-Eros.*, 19, 85-95.
- Roose E., DE Noni G. et Laamachère J-M., 1998. L'érosion à l'ORSTOM : 40 ans de recherches multidisciplinaires. Rés. Rro. Orstom, Montpellier, France. 66 p.
- Roose, E., 1991. Conservation des sols en zones méditerranéennes - Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la CGES, Cahiers ORSTOM, série Pédologie, XXVI (2), 145-181.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rovira, A. Battalla R.J., 2006. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: the lower Tordera (NESRAIN). *Geomorphology*, 79 : 58-71.
- Sauvage, Ch., 1962. Le quotient pluviométrique d'Emberger, son utilisation et la représentation géographique de ses variations.
- Seltzer, P., 1946. Le Climat de l'Algérie. Univ. Alger. Météo et phys. De globe, Carbonnel. 219 p. 2 cartes.
- Smith B.P.G., 2003. Characterizing the fine budget of a reach of the River Swale, Yorkshire, U.K. during the 1994 to 1995 winter season. *Hydrobiologia*, 494, 135-143.
- Snoussi M., 1988. Nature estimation et comparaison des flux de matière issus des bassins versants de l'Adour (France), de Sebou, de l'Am-Er-Rabia et de Sous (Maroc). Impact du climat sur les apports fluviaux à l'océan. Mémoire de l'institut de Géologie du bassin de l'Aquitaine, no 22, Bourdeaux, France.
- Syvitski JPM, 2003. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Global and Planetary change*; 39: 1-11.
- Syvitski JPM, Peckham S.D, Hilbert R. and Mulder T, 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective; 162: 5-24.
- Talbi E., 2008. Evaluation de la Ressource en eau Superficielle (Bilan Hydrique des Bassins Versants du Nord de l'Algérie). Thèse de Magister, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 119 p.
- Vanmaercke M., Zenebe, A., Poesen, J., Nyssen, J., Verstraeten, G., Deckers, J. , 2010. Sediment dynamics and the role of flash floods in sediment export from medium-sized catchments: a case study from the semi-arid tropical highlands in northern Ethiopia. *J. Soils Sediments* 10, 611–627.
- Walling D.E & Lambert C.P., 1988. Measurement of channel storage of suspended sediment in a gravel-bed river. *CATENA* vol.15, 65-80.
- Walling D.E, 1984. The sediment yield of African rivers. In: challenges in African Hydrology and water Resources, 265-283. IAHS Publ. 144. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Walling D.E, Frang D., 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary change*, 39: 111-126.

REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Walling D.E., Webb, B.W., 1981. The reliability of suspended load data. In: Erosion and Sediment transport measurement. IAHS Publ., 133, 177-194.
- Walling D.D., Webb D.W., Woodward J.C., 1992. Some Sampling considerations in the design of transport. IAHS. Publ. 201, 279-288.
- Williams G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. Journal of hydrology, 111, 89-106.
- Wischmeier W.H., D.D. Smith & R.E. Umland, 1958. Evaluation of factors in soil loss equation. Agr. Eng. ASAE 39(8):458-464, 474.
- Wood P.A., 1977. Sediment transport in the Hope River, Jamaica: a tropical drainage basin characterized by seasonal flow. I.A.H.S. Publ., 22, 149-156.

Résumé

L'Algérie, caractérisée par un climat semi aride est menacée par l'érosion des terres agricoles qui provoque le transport solide et l'envasement des barrages. L'analyse de la forme de l'hystérésis produite entre les débits et concentration mesurés à l'exutoire d'un bassin versant est utilisée pour comprendre les processus qui opèrent dans le bassin versant et qui conditionnent la production des sédiments. Sept types de forme sont déterminées pour étudier cette relation, à savoir : courbe simple, hystérésis positive, hystérésis négative, hystérésis en forme de huit et courbe simple avec une boucle soit positive soit négative et forme complexe (courbe simple plus plusieurs boucles).

Trois aspects sont investis, analyse de la forme de l'hystérésis produite, analyse de l'aspect énergie traduisant la capacité de transport de l'écoulement, le troisième aspect est l'identification des principaux processus responsables de la forme de la relation C-Q. L'étude est menée à travers quatre bassins versants, oued Isser à la station de Remchi, Oued Isser à la station de Lakhdaria, Oued Saf-Saf à la station de El Ancer et Oued El Kebir à la station de Khemakhem.

Une étude détaillée sur les statistiques des formes, et l'influence du temps d'arrivée des événements produits à la station de Lakhdaria est présentée.

Mots-clés : débit liquide, concentration, crue, hystérésis, nord Algérie.

Abstract

Algeria, characterized by a semi-arid climate is threatened by the erosion of the arable lands which causes solid transport and they can reduction in the capacity of a stream for handling floods.

The analysis of the form of the hysteresis produced between the flows and concentration measured with the discharge system of a catchment area is used to understand the processes which operate in the catchment area and which condition the production of the sediments. Seven common classes of such relations are: single-valued (straight or curved), clockwise loop, Counterclockwise loop, figure eight, single-valued plus a loop, clockwise or Counterclockwise, and form complex (single-valued plus several loops).

Three aspects are invested, analyze form of produced hysteresis and analyze aspect energy translating the transport capacity of the flow, the third aspect is the identification of the main processes responsible for the form of relation C-Q. The study is undertaken through four mining areas slopes, Oued Isser in the station of Remchi, Oued Isser in the station of Lakhdaria, Oued Saf-Saf in the station of El Ancer and Oued El Kebir in the station of Khemakhem.

A study detailed on the statistics of the forms, and influences it inbound time of the events produced at the station of Lakhdaria is forwarded.

Key words: water discharge, sediment concentration, flood, hysteresis, north Algeria

المخلص

الجزائر تتميز بمناخ شبه جاف، مهدد بانجراف التربة الصالحة للزراعة ينتج عنه مواد صلبة و ترسبات في السدود. سنقوم بدراسة صيغة العلاقة بين التدفق المائي و تركيز المواد الصلبة العالقة لفهم الظواهر التي تؤثر على الحوض , سبع نماذج تم إظهارها لدراسة هذه العلاقة مع إدراجها علي ثلاث حالات : الهيئة, الطاقة التي تبين قدرة النقل للتدفق مع إظهار أهم الظواهر المسئولة علي صيغة العلاقة بينهما. تمت الدراسات علي مستوى أربعة أحواض: حوض واد سكاك, حوض واد يسر, حوض واد صاف- صاف, حوض واد الكبير. دراسة مفصلة علي إحصائيات الصيغة و تأثير الوقت وصول الحدث علي مستوى حوض الاخضارية.

الكلمات المفتاحية:

التدفق المائي, تركيز المواد الصلبة, فيضان, شمال الجزائر